В. А. РОМАНЮК, Л. В. СКРЫПНИК, А. И. МИНОЧКИН

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗОНДОВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ В МОБИЛЬНЫХ РАДИОСЕТЯХ

Проведен качественный анализ методов зондовой маршрутизации в сетях с динамической самоорганизующейся архитектурой при отсутствии базовых станций и фиксированных маршрутов передачи информации.

Сети MANET (Mobile Ad-Hoc Networks) — динамическая самоорганизующаяся архитектура построения мобильных радиосетей (МР), предполагающая отсутствие базовых станций и фиксированных маршрутов передачи информации [1]. В данных сетях все узлы мобильны. Под узлом сети понимается терминал (переносной компьютер, персональный секретарь, сенсорное устройство и др.), оснащенный радиомодемом и реализующий функции маршрутизатора.

Классическими примерами МР являются сети военного назначения (тактического уровня) [2] и сети обеспечения национальной безопасности в кризисных ситуациях. Другие сценарии применения данных сетей включают в себя персональные сети связи для дома или офиса; сенсорные сети; проведение конференций, олимпиад; обучение в виртуальных классах.

МР характеризуются: высокой динамикой топологии, значительной размерностью, низкой (по сравнению со стационарными сетями) пропускной способностью радиоканалов, неоднородностью узлов (по мобильности, ресурсам мощности и производительности), высокой плотностью их размещения на местности.

Основной проблемой управления МР является маршрутизация информационных сообщений [3]. Метод маршрутизации (ММ) должен соответствовать условиям функционирования данной сети и удовлетворять следующим основным требованиям: распределенное (децентрализованное) функционирование; минимальная загрузка сети служебной информацией; быстрая сходимость, отсутствие зацикливания маршрутов; получение маршрута по мере необходимости (режим «молчания»); обеспечение нескольких маршрутов доставки информации к адресату; поддержка асимметричных каналов. В настоящее время для МР предложен ряд ММ, которые по способу построения и поддержания маршрута делятся на два основных класса: таблично-ориентированные и зондовые [1; 3]. В условиях динамичной топологии предпочтительны зондовые методы маршрутизации (ЗММ), которые отвечают перечисленным требованиям. Из всего известного множества ЗММ $\{U_\rho\}$, $\rho = 1, \ldots, P$: DSR (Dynamic Source Routing), AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector), SSR (Signal Stability Routing), TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm),

ABR (Associativity-Based Routing). [1; 3] подробнее будем рассматривать первые два, так как они предложены для стандартизации исследовательской группой IETF (Internet Engineering Task Force) [1].

Функционирование ЗММ охватывает два основных этапа: *построение маршрута* и *его поддержание* (в методе TORA добавлен третий этап — стирание маршрута). Например, метод DSR строит маршрут следующим образом [1; 3]. Отправитель *a*, не имея маршрута к адресату *b* и желая передать ему пакет, волновым способом передает всем узлам сети зонд-запрос (ЗЗ), содержащий идентификаторы адресата и отправителя, а также порядковый номер пакета. Узел *i*, приняв ЗЗ, поступает следующим образом:

▲ если принят дубликат зонда (каждый узел хранит определенное время информацию о принятых зондах), тогда информация о полученном маршруте (отправитель—узел *i*) заносится в маршрутную таблицу или кэш (происходит процесс «обучения») и зонд стирается;

▲ если узел *i* имеет маршрут к адресату, то он отправителю посылает зонд-ответ (ЗО) с данным маршрутом, иначе — он добавляет свой идентификатор в ЗЗ и широковещательно передает его далее.

При получении адресатом первого ЗЗ он посылает отправителю ЗО с информацией о полученном маршруте (критерий выбора маршрута — минимальное время доставки). Будем называть данный маршрут первичным.

На втором этапе (поддержания) каждый узел в первичном маршруте анализирует состояние своих каналов активным (квитирование протоколом канального уровня факта приема сообщения) или пассивным способом (прослушивание наличия ретрансляции сообщения соседним узлом). Узел, обнаруживший отказ в первичном маршруте, посылает сообщение об отказе маршрута (СОМ) узлу-отправителю. В процессе передачи СОМ узлы первичного маршрута стирают информацию о нем. Получив СОМ, отправитель ищет в кэше альтернативный маршрут и при его отсутствии снова начинает этап построения маршрута.

Основное отличие рассматриваемых ЗММ — это метрики выбора маршрутов, определяющие формат зондов и способы хранения маршрутной информации: последовательность узлов и кэш (DSR); число ретрансляций, следующий узел в маршруте передачи и аналогичные строки маршрутной таблицы (AODV); вес узла и маршрутная таблица направления передачи (TORA).

Модель сети. Сеть представляется ненаправленным графом $G = (N, E)$, где $|N|$ — множество узлов, а $|E|$ — множество двунаправленных каналов. Каждый узел имеет идентификационный номер. Все узлы передают одинаковой мощностью. Применяется один из протоколов канального уровня (например, IEEE 802.11).

Однако наряду с преимуществами зондовая маршрутизация имеет ряд недостатков.

▲ Значительный объем служебного трафика $V_{с.т}$, вызванный волновым характером распространения ЗЗ:

$$V_{с.т}(U_\rho) = N_{зз} V_{зз}^{\ \rho} + K(l_k - 1) V_{зо}^{\ \rho}, \qquad (1)$$

где $N_{зз} = N$ — числу узлов сети; l_k — длина маршрутов передачи ЗО от k-х узлов, имеющих маршруты к адресату, $k = 1, \ldots, K$; $V_{зз}^{\ \rho}$, $V_{зо}^{\ \rho}$ — объемы зондов (запроса и ответов) при использовании U_ρ метода маршрутизации, $\rho = 1, \ldots, P$. Заметим, что объем зонда при методе DSR увеличивается при каждой ретрансляции.

▲ Значительное время построения $t_{п.м}$ маршрута m, которое зависит от глубины h_ρ зондирования сети и объема зондов V_ρ при

$$t_{п.м}(U_\rho) \le 2\sum_{i=1}^{h_\rho} (\beta t_{ij} + t_{обi} + t_{ожi}) + t_{ож.м}, \qquad (2)$$

где $h_\rho = d$ — диаметр сети; $t_{ij} = V_{ij}^{\ \rho}/s$ — время передачи пакета по каналу $(i, j) \in m$; V_{ij} — объем зонда; s — скорость передачи в канале; $\beta \ge 1$ — множитель, учитывающий протокол канального уровня (неконтролируемый ALOHA, с контролем несущей CSMA/CA и т. д.); $t_{обi}$, $t_{ожi}$ — время соответственно обработки пакета в i-м узле ($i \in m$) и его ожидания в очереди на передачу; $t_{ож.м}$ — время ожидания адресатом маршрута заданного качества ($t_{ож.м} = 0$ при посылке адресатом ЗО на первый принятый ЗЗ). Время поддержания $t_{пд}$ (восстановления) маршрута для существующих ЗММ одинаково $t_{пд} = t_{п.м}$.

▲ Неоптимальное хранение информации о маршрутах (DSR).

▲ Использование единственной метрики выбора кратчайшего маршрута: число ретрансляций (AODV), время передачи (DSR), уровень сигнала (SSR), направление передачи (TORA).

▲ Возможность построения неоптимальных (не минимальной «стоимости») маршрутов вследствие кратковременных отказов в радиоканалах или перегрузках в узлах сети.

▲ Увеличение заголовка (соответственно и объема служебного трафика) при увеличении размерности сети для метода DSR.

Рассмотрим возможные способы устранения указанных недостатков или снижения отрицательного их воздействия с целью повышения эффективности функционирования сети.

Повышение эффективности функционирования ЗММ в МР может быть достигнуто ограничением числа передаваемых зондов $N_{зз}$, уменьшением $t_{п.м}$ и $t_{пд}$, оптимизацией хранения и обработки маршрутной информации, использованием методов многопараметричной, многопутевой и активной маршрутизации.

Ограничение количества передаваемых зондов может быть достигнуто локальным зондированием и селективным выбором узлом для ретрансляции.

✦ ***Локальное зондирование (ограничение зоны рассылки зондов значением h_ρ).*** Минимизация количества рассылаемых ЗЗ $N_{зз}$ может быть осуществлена локальным зондированием, предполагающем рассылку зондов в ограниченной зоне сети. Для этого в формат зонда вводится поле TTL (Time-To-Live), h_ρ = TTL. Каждый узел при ретрансляции зонда вычитает из текущего значения TTL единицу. Если значение TTL = 0, то зонд уничтожается.

На этапе построения маршрута узел может использовать способ локального зондирования k раз с переменной глубиной ($TTL_1 = 2$, $TTL_2 = 4$, ... , $TTL_k = 2k$). Это позволит уменьшить $N_{зз}$ в ситуации, когда адресат находится в нескольких ретрансляционных участках от отправителя. Однако данный способ может увеличить время $t_{п.м}$ при значительном расстоянии до адресата.

При использовании в узлах сети оборудования позиционирования ограничение зоны рассылки зондов будет осуществляться ограничением геометрического расстояния и применением правил локального направленного зондирования [4].

На этапе поддержания (восстановления) маршрута в зависимости от длины отказавшего участка первичного маршрута локальное зондирование может осуществляться:

▲ промежуточным узлом, обнаружившим отказ в первичном маршруте, если он расположен ближе к адресату с глубиной рассылки $h_р = 2, 3$;

▲ отправителем, если отказавший канал ближе к нему. Глубина зондирования рассчитывается из предположения, что длина нового маршрута возрастет незначительно: $h_р = l_{о.м} + l_п$, где $l_{о.м}$ — длина отказавшего маршрута; значение $l_п = f(\upsilon, N)$ — прирост маршрута (зависит от мобильности адресата и размерности сети).

✦ ***Селективный выбор узлов для ретрансляции зондов за счет применения волновых алгоритмов (ВА) передачи [5].***

Уменьшение числа передач зондов осуществляется следующими способами:

▲ **ВА$_1$** — случайный выбор ретранслятора. Каждый узел задерживает передачу зонда на случайную величину $z = b(h - 1) + a$, где b — константа; h — число ретрансляций зонда; a — случайное число в промежутке [0, 1]. Узел, услышав передачу всех своих соседей, не передает данный зонд.

▲ **ВА$_2$** — детерминированный выбор ретрансляторов. Каждый узел поддерживает информацию о связности с соседними узлами на расстоянии двух ретрансляционных участков. Это позволяет выбирать отдельные адреса следующих ретрансляторов для широковещательной передачи.

▲ **ВА$_3$** — узел, находящийся в аномальном состоянии (перегрузка, малая емкость батареи, высокий уровень помех и т. д.), не ретранслирует ЗЗ. Данный способ позволяет исключить построение маршрутов «плохого» качества.

Уменьшение времени построения $t_{п.м}$ (поддержания $t_{пд}$) маршрута может быть достигнуто следующими способами:

✦ ***Двухэтапное построение адресатом маршрута заданного качества.*** Величина $t_{п.м}$ зависит от времени ожидании адресатом $t_{ож.м}$ прихода совокупности ЗЗ для выбора маршрута заданного качества. В этой ситуации для уменьшения $t_{п.м}$ адресату необходимо посылать ЗО на первый принятый ЗЗ (даже если полученный маршрут не удовлетворяет заданному качеству) и после этого ожидать (вычислять) маршрут заданного качества. Кроме этого, для обнаружения отсутствия связности с адресатом (ситуация разделения сети на несвязные компоненты) время построения маршрута должно быть ограничено $t_{п.м} < 2\beta d t_{п.о} + c$, где d — диаметр сети; $t_{п.о}$ — среднее время передачи и обработки пакета при одной ретрансляции; β — коэффициент, учитывающий протокол доступа к каналу; c — константа.

✦ ***Упреждающее построение нового маршрута.*** Для различных типов трафика, например речи, величина $t_{пд}$ имеет предельное значение. Возможным решением при данной ситуации является прогнозирование времени существования маршрута и упреждающее построение нового маршрута (аналогично в системах сотовой связи при ухудшении качества связи осуществляется переключение на заранее подготовленный канал). Решение об упреждающем построении нового маршрута может осуществляться двумя способами: каждым промежуточным узлом в первичном маршруте или отправителем [6].

▲ Каждый узел оценивает состояние радиоканалов, используемых активными маршрутами, и при ухудшении их качества ниже определенного порога (еще не приводящего к отсутствию связи) начинает процесс локального зондирования для перестроения (нахождения нового) маршрута.

▲ Отправитель прогнозирует время существования всего первичного маршрута. Для этого каждый промежуточный узел при распространении ЗЗ включает в него прогнозируемое время существования канала $t_{с.к}$ данного маршрута m. Адресат, приняв ЗЗ, определяет время существования маршрута $t_{с.м} = \min\{t_{ckij}\}$, $(i, j) \in m$ и включает данное значение в ЗО. Получив ЗО, отправитель будет знать время начала построения нового маршрута.

✦ ***Обучение маршрутам и их оптимизация.*** При функционировании сети через каждый узел будет проходить значительное количество зондов и информационных пакетов, что позволяет узлам «обучаться» маршрутам (записывать в память новые маршруты, корректировать уже имеющиеся) и использовать их в дальнейшем. Это позволяет уменьшить $t_{п.м}$ ($t_{пд}$) или даже исключить этапы построения (поддержания) маршрутов и тем самым сократить $V_{с.т}$. Наилучшими возможностями обучения обладает метод DSR, так как зонды содержат маршрут в виде последовательности узлов. Проведенные исследования показали, что обучение позволяет более чем на треть снизить служебный трафик [7]. Однако при отказе канала СОМ посылается только по первичному маршруту, и поэтому остальные узлы сети будут хранить неверную маршрутную информацию. Следовательно основной проблемой является старение информации о неактивных маршрутах по прошествии определенного времени. Возможными решениями могут быть:

▲ при построении нового маршрута оказывать помощь в стирании отказавших маршрутов (для этого необходимо включить в состав ЗЗ информацию об отказавшем канале, что позволит узлам исключить отказавшие маршруты);

▲ каждый узел в первичном маршруте посылает сообщение об отказе маршрута всем отправителям, использующим отказавший канал;

▲ хранение временных характеристик маршрута (время получения, последнее время использования, среднее время существования) и тестирование неактивного маршрута перед его использованием (посылка пробного пакета);

▲ хранение (определенный интервал времени) информации об отказах каналов, что позволит не передавать пакеты по отказавшим маршрутам.

✦ ***Применение многопараметрической маршрутизации.*** В существующих ЗММ используется однопараметрическая маршрутизация, которая не учитывает требования по передаче той или иной информации и условия функционирования МР (мобильность, емкость батарей узлов, загрузку, качество радиоканалов). В настоящее время известны два основных способа передачи пакета: «с максимальным усилием» (Best of Effort, BE) и с заданным качеством обслуживания (Quality and Service QoS). Требования к маршруту передачи пакета могут выражаться следующими основными параметрами: про-

пускной способностью, задержкой, числом ретрансляций, вероятностью доставки, уровнем безопасности. Фактически рассматриваемые ЗММ реализуют способ ВЕ. Для построения маршрутов с заданным качеством необходимо использовать множество параметров, которое определяется типом передаваемой информации и условиями функционирования МР. Например, в ММ, обеспечивающем построение маршрута заданной пропускной способности, каждый ЗЗ собирает информацию о числе свободных слотов передачи (при использовании TDMA) [8]. При необходимости доставки информации с заданной надежностью (многопутевая маршрутизация) ЗЗ должен содержать следующие параметры: число независимых маршрутов передачи, список соседних узлов [9]. При асимметричной маршрутизации (характерна для МР вследствие неоднородности мощности узлов сети) в ЗЗ необходимо учитывать однонаправленность каналов [10]. Для уменьшения объемов ЗЗ возможно агрегирование информации состояния узлов (включение в формат зонда только тех параметров узлов и каналов, которые выходят за пределы нормы) и объединение нескольких зондов в один пакет.

+ ***Активная маршрутизация*** [11]. В реальной ситуации цели управления сетью могут отличаться. Следует различать оптимизацию характеристик сети в целом (или ее участка) или между парами отправитель—получатель с сохранением некоторого равновесия для всей сети. Например, сетевая оптимизация может предполагать максимизацию пропускной способности max S, времени жизни сети max $T_ж$ или минимизацию времени доставки сообщений min $t_з$. Выбор той или иной цели управления зависит от принятой системы приоритетов. Например, для сообщений высокой категории срочности может быть реализован метод маршрутизации, оптимальный для отдельных направлений связи, а для других, менее приоритетных сообщений — метод, оптимизирующий сетевые характеристики. Рассмотрим особенности некоторых методов активной маршрутизации.

▲ *Применение совокупности методов маршрутизации.* Единого ММ, оптимизирующего все показатели эффективности МР, не существует. Преимущества того или иного метода проявляются при различных условиях функционирования сети (динамика топологии, уровень нагрузки) [12]. Например, при низком уровне мобильности более эффективен AODV, при высокой — DSR и очень высокой — волновой. Поэтому в МР целесообразно использовать не один ММ, а их совокупность $\{U_\rho\}$, $\rho = 1, ..., P$. Применение конкретного U_ρ предполагает оценку каждым узлом ситуации на сети. Изменение топологии v сети можно оценить по следующим показателям: соотношению объема служебной и полезной информации δ или интенсивности генерации сообщений об отказах маршрутов. Для принятия решения о применении U_ρ используются методы ситуационного управления: если $\delta > \delta_н$, тогда применять DSR; если $\delta_н < \delta < \delta_в \rightarrow$ AODV ($\delta_н$, $\delta_в$ — нижняя и верхняя границы эффективного применения ММ); если $\delta < \delta_в$ — волновой метод. Значения $\delta_н$, $\delta_в$ рассчитываются на этапе проектирования МР с помощью моделирования. Интенсивность генерации СОМ позволяет варьировать глубину рассылки зондов $h_р$ (прирост маршрута $l_п$ в переменной TTL).

▲ *Построение маршрутов (зондирование) адресатом.* Организационно-техническое построение сети может определять ряд адресатов, с которыми будет постоянно поддерживать информационный обмен большинство узлов сети (например, узел МР, подключенный к стационарной сети связи, или узел, занимающий ведущее место в иерархии управления — центр управления сетью). Поэтому для сокращения количества ЗЗ при построении маршрутов отправителями целесообразно возложить функцию построения маршрутов на адресата. Он будет осуществлять периодическое зондирование сети для постоянного поддержания соответствующих маршрутов.

Проведенные исследования с использованием имитационного моделирования показали, что рассмотренные способы оптимизации функционирования ЗММ позволяют значительно (до 50%) снизить объем служебного трафика и в 2–3 раза сократить время построения (поддержания) маршрутов.

* * *

Повышение эффективности МР в целом может быть достигнуто за счет реализации предложенных способов функционирования зондовой маршрутизации: локального зондирования, зондирования с переменной глубиной, селективного выбора ретрансляторов, зондирования адресатом, обучения маршрутам передачи, двухэтапного построения адресатом маршрута заданного качества, упреждающего построения нового маршрута, а также применением методов многопараметрической, многопутевой и активной маршрутизации.

Литература

1. *http:// www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html.*
2. *Романюк В. А. Направления развития тактических сетей связи // Зв'язок.— 2001.— № 3.— С. 63–65.*
3. *Миночкин А. И., Романюк В. А. Протоколы маршрутизации в мобильных радиосетях // Зв'язок.— 2001.— № 1.— С. 31–36.*
4. *Романюк В. А. Геомаршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок.— 2001.— № 5.— С. 61–63.*
5. *Романюк В. А. Волновая маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок.— 2003.— № 4.*
6. *Goff T., Abu-Ghazaleh N.-B., Phatah D. S., Kahvecioglu R. Preemptive Routing in Ad Hoc Networks // In Proceeding of ACM/IEEE MOBICOM, 2001.*
7. *Panchal N. I., Abu-Ghazalen N. B. Active Route Cache Optimization for Ad hoc Networks // In Proceedings of IEEE INFOCOM'02, 2002.*
8. *Романюк В. А. Маршрутизация интегрального трафика в мобильных радиосетях // Зв'язок.— 2002.— № 2.— С. 24–27.*
9. *Pham P. P., Perreau S. Performance analysis of reactive shortest path and multi-path routing mechanism with load balance // In Proceedings of IEEE INFOCOM'03, 2003.*
10. *Романюк В. А. Асимметричная маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок.— 2003.— № 3.— С. 28–30.*
11. *Романюк В. А. Активная маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок.— 2002.— № 3.— С. 21–25.*
12. *Lee S.-J., Hsu J., Hayashida R., Gerla M. Selecting a routing strategy for your ad hoc networks // Computer Communication.— 2003.— № 26.— P. 723–733.*