

В. А. РОМАНЮК, канд. техн. наук, доцент

МАРШРУТИЗАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ТРАФИКА В МОБИЛЬНЫХ РАДИОСЕТЯХ

Одной из основных задач оперативного управления мобильными радиостанциями (МР) является маршрутизация информационных сообщений. В настоящее время для применения в МР предложен ряд методов маршрутизации [1]. Однако они не предусматривают построение маршрутов с заданным качеством обслуживания (QoS — quality of service) [2], хотя существующий трафик неоднородный и требует заранее определенных параметров маршрута [3]. Например, компьютерный трафик, который может быть вызван приложениями реального времени, характеризуется высоким коэффициентом пульсаций (отношение максимальной мгновенной интенсивности трафика к его средней интенсивности) и чувствителен к потерям. Мультимедийный трафик (речь, изображение, видеоконференция) требует значительной полосы частот, характеризуется низким коэффициентом пульсаций и малой чувствительностью к потерям данных (потерю отдельных результатов измерения голоса или кадров можно компенсировать сглаживанием на основе предыдущих и последующих значений). Когда речь идет о QoS, обычно подразумевается набор таких параметров, как пропускная способность, задержка доставки пакета, вероятность его потери, буферное пространство и другие (для определенного потока данных). Наиболее важными параметрами являются первые два. Они используются для построения маршрутов с заданной пропускной способностью или задержкой. Поэтому возникает задача маршрутизации различных видов трафика с заданным качеством обслуживания.

Математическая постановка задачи. Сеть представляется ненаправленным весовым графом $G = (V, E)$, где V — множество узлов; E — множество каналов. Каждый канал $e = (v_i, v_j) \in E$ может характеризоваться положительной метрикой: пропускной способностью $w(e) \in Z^+$, (например, $1 = 10$ кбит/с) и задержкой распространения $d(e) \in Z^+$ (например, $1 = 10$ мс).

Обозначим ациклический путь p в G как последовательность узлов $(v_1, \dots, v_i, \dots, v_n)$, таких, что $i, 1 \leq i \leq n$, $(v_i, v_{i+1}) \in E$. Определим $d(p)$ и $w(p)$ как задержку и пропускную способность пути p . Очевидно, что

$$d(p) = \sum_{i=1}^{n-1} d(v_i, v_{i+1}) \quad \text{и} \quad w(p) = \min_{i \in p} \{w(v_i, v_{i+1})\}.$$

В общем случае может быть получено K независимых маршрутов передачи от отправителя к адресату $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$. При этом пропускная способность

$$W(P) = \sum_{k=1}^K w(p_k).$$

При передаче информации по K маршрутам задержка передачи информации в сети определяется маршрутом с максимальной задержкой

$$D(P) = \max_{p_k \in P} \{d(p_k)\}.$$

Тогда задача QoS маршрутизации может быть сформулирована так: найти маршрут p (или множество мар-

шрутов $P = \{p_k, \overline{k=1, K}\}$, удовлетворяющий условию $W(P) \geq W_0$, где W_0 — необходимая пропускная способность при минимальной задержке передачи $\min_p D(P)$.

Рассмотрим существующие подходы к решению данной задачи.

Обеспечение процесса передачи информации с заданным качеством обслуживания в МР охватывает следующие уровни: модель QoS, QoS сигнализацию по резервированию ресурсов, QoS маршрутизацию и QoS канального уровня.

♦ **Модель QoS** — это архитектура сети, предназначенная для оптимизации использования ресурсов сети при передаче трафика реального времени. Все другие QoS компоненты (сигнализация, маршрутизация и канальный уровень) должны согласовать свои действия для достижения этой цели. В Internet модель QoS определена двумя основными направлениями интеграции услуг: предоставление интегрированных услуг (Integrated Services, IS), предоставление дифференцированных услуг (Differentiated Services, DS) [3]. В случае IS обеспечивается масштабируемое сервисное разделение без выделения потоков и проведения сигнализации при каждом переходе. Поэтому нет необходимости в уникальном резервировании параметров QoS для каждого потока. При DS трафик Internet разбивают на различные классы с различными требованиями к QoS. Центральный компонент DS — соглашение об уровне сервиса (Service level Agreement, SLA). Однако поскольку в МР нет понятия провайдера и клиента, данный подход не применим.

♦ **QoS сигнализация** играет управляющую роль и координирует поведение QoS маршрутизации и QoS канального уровня. В Internet для предоставления IS используется протокол резервирования ресурсов RSVP (ReSerVation Protocol). Согласно данному протоколу маршрутизатор должен предоставлять и поддерживать QoS для каждого потока в соответствии с его сервисной моделью. Основную функцию маршрутизатора — контроль и управление поступающим потоком информации — обеспечивают следующие основные подсистемы: планировщик пакетов (планирование и управление очередями), классификатор пакетов (идентификация пакетов в соответствии с необходимым уровнем обслуживания) и контроль доступа (наличия необходимых ресурсов) [2]. Однако применение IS (протокола RSVP) в МР невозможно, так как требуется:

- передача большого объема служебной информации (информация состояния пропорциональна количеству потоков, что представляет проблему даже для Internet);
- достижение высокой производительности процессора и значительного объема памяти в узлах сети (при RSVP каждый мобильный узел должен осуществлять планирование пакетов, их классификацию и контроль доступа);

- учет протокола канального уровня.

Первым предложенным протоколом сигнализации для МР был INSIGNIA [4]. Он поддерживает простое резервирование и освобождение ресурсов узлов для заданного потока, реализуя простейшие алгоритмы адаптации ресурсов узлов к интегральному трафику. Однако данный протокол имеет ограниченное число сервисов, а информация о потоках должна храниться в каждом мобильном узле (что проблематично с ростом числа потоков).

♦ **Основная часть резервирования ресурса — это маршрут.** Поскольку протокол сигнализации — это протокол управления IP-сетью, а не протокол маршрутизации, то необходимо, чтобы совместно с ним функционировал один из протоколов маршрутизации. Известны два основных подхода к построению и поддержанию маршрута в МР: таблично-ориентированные и зондовые методы маршрутизации (ММ) [2]. Особенности МР обуславливают основные требования к ММ: распределенное функционирование, минимальная нагрузка сети служебными сообщениями, отсутствие заикливания маршрутов, быстрая сходимости [5]. В [6; 7] предложено для построения и поддержания маршрута использовать таблично-ориентированный метод маршрутизации DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector) [2]. В зависимости от качества обслуживания предлагается как метрику выбора маршрута использовать значения пропускной способности канала или задержку передачи пакета. Однако данное решение справедливо для МР с низкой мобильностью и незначительной нагрузкой, иначе применение данного ММ вызовет значительный служебный трафик (из-за необходимости передавать измененные значения метрик каналов). Поэтому более предпочтительны зондовые ММ [9]. К преимуществам зондовых ММ относятся построение маршрута по мере необходимости (реализация режима скрытности и отсутствие периодической рассылки маршрутных сообщений, т. е. значительно меньший объем служебного трафика по сравнению с таблично-ориентированными ММ); возможность обучения (построение маршрутов на основе информации, имеющейся у проходящих через узел зондов), отсутствие заикливания маршрутов, возможность построения нескольких маршрутов передачи информации.

♦ **Все верхние QoS уровни зависят от канального уровня и координируют с ним свои действия.** На канальном уровне может использоваться протокол случайного множественного доступа или протокол с временным разделением каналов. В [5] предлагается модификация функций протокола IEEE 802.11 для построения дифференцированного сервиса. Недостатком данного подхода является необходимость централизованного управления сервисом, что не удовлетворяет требованиям МР. В [10] предложены механизмы усовершенствования децентрализованной версии данного протокола. Однако из-за наличия проблемы «скрытого абонента» и возможных столкновений пакетов параметры маршрута слабо прогнозируемы. Пропускная способность — наиболее критичный ресурс в МР для приложений реального времени. Поэтому на канальном уровне предпочтительно временное разделение. Чтобы исключить проблему «скрытого абонента», для каждого слота необходимо использовать кодовое разделение, т. е. гибридный протокол доступа к каналу TDMA/CDMA [8].

Таким образом, для обеспечения заданного качества обслуживания информационных потоков в МР маршрутизация играет решающую роль. Для уменьшения служебного трафика основные компоненты QoS целесообразно включить в маршрутизацию. Процесс маршрутизации состоит из таких этапов: построение маршрута с заданным качеством (с учетом принятого канального уровня), осуществление резервирования данного маршрута и поддержание его с заданными параметрами.

Рассмотрим реализацию QoS маршрутизации для зондовых методов маршрутизации: Dynamic Source Routing (DSR) или Ad-hoc On-demand Distance Vector routing (AODV) [2]. Функционирование зондовых методов маршрутизации включает в себя два этапа: построение и поддержание маршрута. Например, метод DSR строит маршрут следующим образом. Отправитель, не имея маршрута к адресату и желая передать ему пакет, передает соседним узлам зонд-запрос (33). 33 содержит такие поля: тип пакета, адресат отправителя, адрес адресата, список промежуточных узлов. Узел, принявший зонд-запрос, добавляет свой идентификатор и передает его далее своим соседям. При получении адресатом 33 он посылает отправителю зонд-ответ (30) с информацией о полученном маршруте. Будем называть данный маршрут первичным. При отказе канала в первичном маршруте узел, обнаруживший отказ, посылает сообщение об отказе узлу-отправителю. После этого процесс построения маршрута повторяется вновь.

Пропускная способность канала в терминах TDMA означает число необходимых слотов передачи. Дадим математическую постановку задачи нахождения маршрута p заданной пропускной способности W_p .

Математическая постановка задачи. Сеть представляется графом $G = (V, E)$, где V — множество узлов; E — множество каналов. Используется протокол доступа к каналу TDMA/CDMA при дуплексной передаче с временным разделением каналов (TDD). Пропускная способность разделена на множество слотов $S = \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$, составляющих фрейм. Предполагается, что каждый узел знает свободные слоты своих соседей. Возможность резервирования множества слотов $\{RS\}$ на передачу определяется множеством свободных $\{SS\}$ ($RS_i \subseteq SS_i$). Необходимая пропускная способность маршрута

$p = (v_1, \dots, v_p, \dots, v_n)$, $i = \overline{1, n}$, $(v_p, v_i+1) \in E$ может быть определена как $W_0 = |RS_i|$. Целевая функция будет зависеть от способа принятия решения о резервировании слотов при построении маршрута.

1-й способ — резервирование слотов промежуточным узлом при каждой ретрансляции зонда-запроса

$$W_0 \geq \min_{i \in p} (SS_i, SS_{i+1}), RS_i \cap RS_{i+1} = \emptyset, i = \overline{1, n-1};$$

2-й способ — резервирование адресатом:

$$W_0 \geq \min_{i \in p} (SS_i, SS_{i+1}, SS_{i+2}), RS_i \cap RS_{i+1} = \emptyset \wedge RS_{i+1} \cap RS_{i+2} = \emptyset, i = \overline{1, n-1}.$$

Каждый из способов обладает своими преимуществами и недостатками. Преимуществом первого способа является быстрое получение решения; недостатком — не гарантируется построение маршрута даже при его наличии. Второй способ устраняет недостаток первого, однако увеличивает размер зондов и требует большей производительности процессора. Рассмотрим примеры ре-

резервирования маршрута с двумя слотами для передачи при первом (рис.1) и втором (рис.2) способах. Резервирование слотов при каждой ретрансляции предложено в [8]. На первом шаге (см. рис.1) узел *a* резервирует слоты {1,4} и {2,7} и передает 33 узлу *b*; на втором — узел *b* резервирует слоты {4,5}. Однако, на третьем шаге узлу *d* остается для резервирования только один слот {8}, и узел *d* стирает 33. Таким образом, выделение двух слотов на маршруте (*a, b, c, d, e, f*) данным способом невозможно.

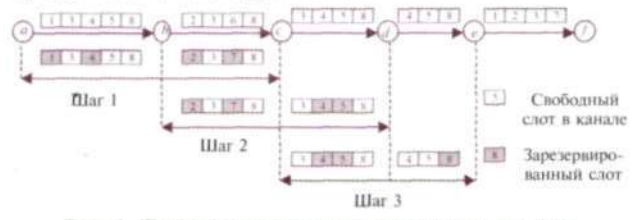


Рис. 1. Пример резервирования слотов при каждой ретрансляции

Однако решение этой задачи возможно при втором способе резервирования (см. рис.2). Поэтому предлагается в дальнейшем использовать данный способ.

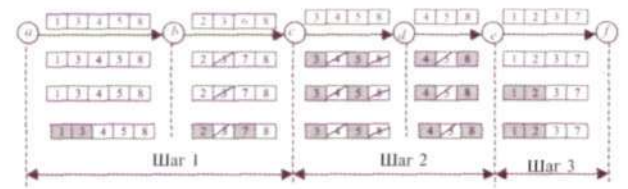


Рис. 2. Пример поиска решения о резервировании слотов адресатом

Приведем описание предложенного ММ для сети, представленной на рис. 3. Здесь свободные слоты в узле помечены фигурными скобками, а в канале — полоской. Предположим, что нам необходим маршрут, состоящий из четырех слотов.

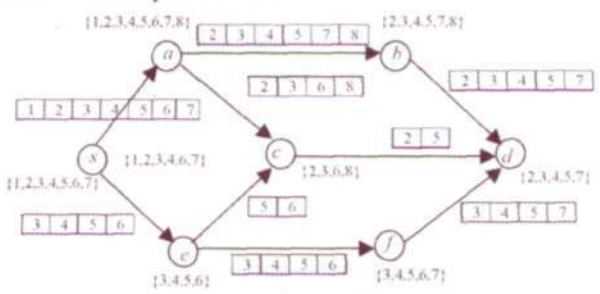


Рис. 3. Пример сети

1-й этап: построение маршрута. Отправитель, не имея маршрута к адресату и желая передать ему пакет, передает соседним узлам зонд-запрос (33_{OS}) следующего формата: тип пакета, адрес отправителя, адрес адресата, список промежуточных узлов и их свободные слоты, требуемая пропускная способность (W_0), предельное число ретрансляций зонда (TTL — time-to-live). Узел, принявший зонд-запрос, проверяет число ретрансляций (сравнивает число прошедших ретрансляций с TTL). Если TTL превышено, то зонд стирается, иначе — узел добавляет свой идентификатор, свободные слоты, значение $TTL=TTL+1$ в зонд-запрос и передает его далее своим соседям.

2-й этап: поиск маршрута заданной пропускной способности. При получении адресатом совокупности 33_{OS} он вычисляет маршрут, удовлетворяющий необходимому качеству обслуживания. На рис. 3 показан пример

построения маршрута от узла *s* к узлу *d*. Узел *d* получит следующие зонды: $33_{OS}(s,d,\{s,a,b,d\}, \{\{1,2,3,4,5,6,7\}, \{2,3,4,5,7,8\}, \{2,3,4,5,7\}\}, 4, TTL)$, $33_{OS}(s,d,\{s,a,c,d\}, \{\{1,2,3,4,5,6,7\}, \{2,5,6,8\}, \{2,5\}\}, 4, TTL)$, $33_{OS}(s,d,\{s,e,c,d\}, \{\{3,4,5,6\}, \{5,6\}, \{2,5\}\}, 4, TTL)$, $33_{OS}(s,d,\{s,e,f,d\}, \{\{3,4,5,6\}, \{3,4,5,6\}, \{3,4,5,7\}\}, 4, TTL)$.

Сначала адресат осуществляет поиск единственного маршрута с заданным значением пропускной способности — $W_0 = 4$. Для рассматриваемого примера такого маршрута нет: $w(p_1)=3, w(p_2)=2, w(p_3)=1$ (рис. 4, а). Тогда происходит поиск нескольких маршрутов доставки информации. В этом случае в целевой функции необходимо учесть взаимное влияние маршрутов (из-за наличия общих узлов и каналов):

$$W(P) = \sum_{k=1}^K w(p_k),$$

$$w(p_k) \geq \min_{i \in p_k} (SS_i, SS_{i+1}, SS_{i+2}) \text{ и}$$

$$RS_i \cap RS_{i+1} \cap RS_{VB_i} \cap RS_{VB_{i+1}} = \emptyset \wedge RS_{i+1} \cap RS_{i+2} \cap RS_{VB_{i+1}} \cap RS_{VB_{i+2}} = \emptyset,$$

$\forall i = \overline{1, n-2}$, где $VB_i = \{v_j \in V: (v_i, v_j) \in E\}$ — множество соседей узла v_i .

Для нашего примера данному условию удовлетворяют два пути p_1 и p_2 : $W(P) = 3 + 1 = 4$ (рис. 4, б). Конечное решение о нахождении путей с $W_0 = 4$ и план резервирования слотов иллюстрирует рис. 4, в.

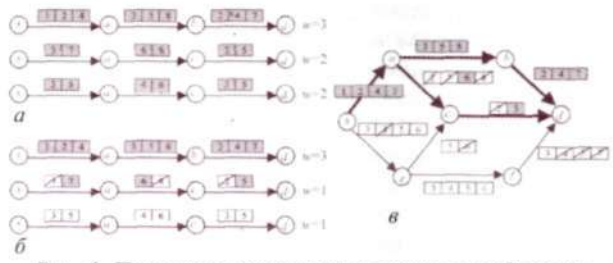


Рис. 4. Построение нескольких маршрутов к адресату

3-й этап: резервирование маршрута. При нахождении маршрута (совокупности маршрутов) заданной пропускной способности узлу-отправителю посылается зонд-ответ следующего формата: тип пакета, адрес отправителя, адрес адресата, список промежуточных узлов и список зарезервированных слотов, полученная пропускная способность. Это означает, что узлом *d* будет послано два зонда: $3O_{OS}(d,s\{d,b,a,s\}, \{\{2,4,7\}, \{3,5,8\}, \{1,2,4,7\}, 3\})$ и $3O_{OS}(d,s\{d,c,a,s\}, \{\{5\}, \{6\}, \{1\}, 1\})$. Каждый промежуточный узел в течение определенного интервала времени ожидает 3O. Получив его, узел резервирует указанные слоты, иначе слоты считаются свободными.

4-й этап: поддержание маршрута. При отказе канала в маршруте узел, обнаруживший отказ, посылает сообщение об отказе узлу-отправителю. После этого процесс построения маршрута повторяется вновь.

Недостатками зондовых ММ являются неопределенность времени ожидания маршрута в случае отсутствия связности с адресатом, увеличение размеров зондов и их количества с ростом размерности сети. Поэтому для минимизации количества зондов при восстановлении маршрута целесообразно применять локальное зондирование (рассылка зондов с ограниченным числом ретрансляций). Причем в зависимости от длины первично-

СЛОВО МАКРОТЕКСТ

го маршрута локальное зондирование может осуществляться:

- узлом, обнаружившим отказ в первичном маршруте, если он расположен ближе к адресату (глубина зондирования составляет несколько ретрансляций);

- отправителем, если отказавший канал ближе к нему (при этом значение TTL равно длине ранее отказавшего первичного маршрута плюс константа, определяемая размерностью сети и мобильностью узлов).

С помощью имитационной модели исследован предложенный метод маршрутизации. Проведенные исследования показали его высокую эффективность по сравнению с MM [8] (на треть выше вероятность построения маршрута заданного качества).

* * *

Задача маршрутизации интегрального трафика в МР, играющая главную роль в поддержке QoS, более сложна, чем в сети Internet, и находится на начальном этапе своего решения. Для уменьшения служебного трафика основные компоненты QoS целесообразно совместить с маршрутизацией. Данный подход использован при построении нового зондового многопутевого метода маршрутизации, обеспечивающего в МР резервирование маршрута заданной пропускной способности.

Литература

1. Миночкин А.И., Романюк В.А. *Протоколы маршрутизации в мобильных радиосетях // Зв'язок.*— № 1.— 2001.— С. 31–36.
2. Chakrabarti S., Mishra A. *QoS Issues in Ad Hoc Wireless Networks // IEEE Communication Magazine.*— 2001.— № 2.— P. 142–148.
3. Кульгин М. *Технологии корпоративных сетей: Энциклопедия.*— СПб: Питер, 2000.— 704 с.
4. Lee S.-B., Ahn G.-S. *Improving UDP and TCP Performance in Mobile Ad Hoc Networks with INSIGNIA // IEEE Communication Magazine.*— 2001.— № 7.— P. 156–165.
5. RFC 2501. *Mobile Ad Hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issue and Evaluation.*— 1999.
6. Chen T.-W., Tsai J.T., Gerla M.. *QoS Routing Performance in Multihop, Multimedia, Wireless Networks // In Proc. IEEE ICUPC, 1997.*
7. Chen S., Nahtstedt K. *Distributed Quality-of-Service Routing in Ad-Hoc Networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communication.*— 1999.— Vol. 17, № 8.— P. 1488–1505.
9. Lin C.R. *On-Demand QoS Routing in Multihop Mobile Networks // In Proc. IEEE INFOCOM'01.*— 2001.