

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

## АКТИВНАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ В МОБИЛЬНЫХ РАДИОСЕТЯХ

Рассматриваются сети MANET (Mobile Ad-Hoc Networks), обладающие динамической самоорганизующейся архитектурой, которая предполагает отсутствие фиксированной сетевой инфраструктуры (базовых станций) и централизованного управления. Все узлы (хосты) такой сети мобильны и обмениваются информацией между собой. Сеть характеризуется значительной размерностью, высокой динамикой топологии, неоднородностью, низкой пропускной способностью радиоканалов, ограниченными ресурсами мощности и производительности большинства узлов, высокой плотностью их размещения, а также возможностью разделения на подсети.

Одной из основных задач оперативного управления мобильными радиосетями (МР) является маршрутизация сообщений. Особенности МР определяют ключевые требования к методам маршрутизации: распределенное функционирование, минимальная нагрузка сети служебной информацией, отсутствие заикливания маршрутов, быстрая сходимость, построение по мере необходимости маршрута заданного качества, эффективное использование емкости батарей, поддержка однонаправленных каналов и обеспечение безопасной маршрутизации.

В настоящее время для применения в МР предложен ряд методов маршрутизации (ММ), которые по способу построения и поддержания маршрута делятся на две основные группы: *таблично-ориентированные* (каждый узел поддерживает кратчайшие маршруты ко всем узлам сети благодаря периодическому обмену содержимым маршрутных таблиц) и *зондовые* (построение маршрута по мере необходимости рассылкой и сбором зондов) [2]. Проведенные исследования [3] показали, что эффективность того или иного метода (достижение оптимума по одному либо нескольким показателям эффективности сети — пропускной способности, средней задержке передачи сообщения) определяется ситуацией в сети: динамикой изменения топологии, интенсивностью входящего трафика, размерностью. Например, при низкой мобильности узлов эффективны таблично-ориентированные методы маршрутизации (ТОММ), при высокой — зондовые методы маршрутизации (ЗММ), при очень высокой — волновой способ передачи. В условиях значительной входной нагрузки предпочтительны ТОММ, низкой — ЗММ. Каждый из ЗММ (DSR, AODV, TORA, ABR, SSA) характеризуется, в свою очередь, некоторыми особенностями построения, поддержания и хранения маршрутов, что и определяет различные диапазоны его эффективного применения [2]. При анализе методов групповой маршрутизации (МГМ) также была установлена зависимость их эффективности от текущей ситуации в сети [4]: при высокой динамике топологии необходимо использовать МГМ, строящие групповые маршруты в виде подсети, при низкой — в виде дерева.

Таким образом, *единого метода маршрутизации, удовлетворяющего всем вышеперечисленным требованиям и обеспечивающего оптимизацию показателей эффективности функционирования сети при различных условиях ее работы, не существует* [5].

Для решения данной проблемы предлагается осуществить так называемую *активную маршрутизацию*, которая (в отличие от традиционных ММ) предусматривает:

- ◆ функционирование в сети множества (а не одного) методов маршрутизации;
- ◆ динамическое формирование метрик выбора маршрута;
- ◆ управление топологией сети как составной частью маршрутизации в МР;
- ◆ интеллектуализация процессов принятия решения по маршрутизации.

Для реализации указанных подходов необходимо в каждом узле сети создать систему оперативного управления маршрутизацией, выполняющую функции, которые можно объединить в несколько более или менее независимых групп: сбор информации о состоянии сети; хранение маршрутов; построение маршрутов; поддержание маршрутов; управление топологией; обучение; обеспечение безопасности.

Исследование системы оперативного управления маршрутизацией в целом представляет сложную проблему. Однако при объединении функций в независимые группы возможна декомпозиция оперативного управления маршрутизацией на подсистемы (рис. 1). *В этом случае математическое обеспечение (совокупность математических методов, моделей и алгоритмов, на базе которых эффективно функционирует сеть) можно разрабатывать по подсистемам, что существенно упрощает задачу.*



Рис. 1. Концептуальная модель системы оперативного управления маршрутизацией

*Подсистема сбора информации* осуществляет сбор и хранение информации о сети, ее зонах и каналах согласно принятой модели управления сетью и маршрутизацией в частности.

*Подсистема построения маршрута* функционирует различными способами. ТОММ предполагают периодический обмен маршрутными сообщениями между узлами сети и вычисление маршрута. Зондовые ММ строят маршрут в три этапа: *на первом* — волновым способом передаются зонды-запросы, *на втором* — адресат принимает зонды-запросы и вычисляет маршрут, *на третьем* — адресат посылает отправителю зонд-

ответ с информацией о маршруте. Особенность предлагаемого подхода — формат зонда-запроса меняется динамически в зависимости от типа передаваемой информации и условий функционирования сети (зонд-запрос несет информацию о требованиях к строящемуся маршруту).

*Подсистема управления топологией* осуществляет маршрутизацию пакетов, регулируя мощность передатчика с использованием направленных антенн и селективно выбора ретранслятора.

*Подсистема поддержания маршрута* может функционировать двумя способами: пассивным — при отказе канала отправителю посылаются сообщения об отказе маршрута и активным, при котором узел прогнозирует состояние существующих каналов в используемых маршрутах и, в случае необходимости, осуществляет упреждающее построение нового участка маршрута [6].

*Подсистема обучения* использует информацию из проходящих через узел пакетов (служебных и информационных) для пополнения (обновления) маршрутной таблицы или кеша [7].

*Подсистема планирования* координирует действия всех подсистем и прогнозирует поведение маршрутов.

*Подсистема обеспечения безопасности* предполагает идентификацию атак противника, оценку возникающих угроз и уязвимости используемых протоколов маршрутизации. Она предназначена для защиты от фальсификации адреса отправителя маршрутной информации (МИ); внедрения в сеть ложной МИ; изменения МИ в процессе ее ретрансляции; формирования маршрутных циклов; перенаправления маршрута; определения сетевой топологии из МИ; участия неавторизованных узлов в процессе вычисления и построения маршрутов [8].

*Подсистема принятия решения* определяет текущую целевую функцию управления, проверяет достижимость поставленной цели и обеспечивает ее реализацию. Результаты работы данной подсистемы: выбор конкретного ММ, формирование формата зонда-запроса на поиск маршрута, определение глубины сбора информации о состоянии сети, назначение адреса ретранслятора, выбор мощности передачи, упреждающее построение маршрута, отказ в обслуживании (уничтожение пакета). Механизм принятия решения может базироваться как на простейших схемах ситуационного управления, так и на теории интеллектуальных систем, основанной на известных способах представления, накопления и преобразования знаний, в том числе и нечеткой информации [9].

Рассмотрим содержание активной маршрутизации.

### ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ МНОЖЕСТВА ММ И СИТУАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ИХ ПРИМЕНЕНИЕМ

Основная идея данного подхода заключается в том, что каждый узел сети реализует множество ММ:  $\{MM\} = \{MM_1, MM_2, \dots, MM_n\}$ ; в зависимости от конкретной ситуации на сети функционирует один из них —  $MM_1$ , который обеспечивает сетевую оптимизацию.

Приведем конкретный пример, когда программным обеспечением каждого узла предусмотрено функционирование трех ММ: двух зондовых — DSR (Dynamic Source

Routing), AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector) и волнового. Выбор методов DSR и AODV обусловлен тем, что они представлены к стандартизации исследовательской группой IETF [1]. Зависимость их эффективности от мобильности узлов выражается следующими правилами: при низком уровне мобильности узлов эффективен DSR, при высоком — AODV, очень высоким — волновой [3]. Применение того или иного ММ предполагает оценку каждым узлом ситуации на сети. Изменение топологии сети он может оценить, зная соотношение  $\delta$  объема служебной и полезной информации, проходящей через него. Для принятия решения о применении конкретного ЗММ используются правила типа «ЕСЛИ условие, ТО действие». Условие характеризует применимость правила в зависимости от текущего состояния сети, действие — описывает решение, направленное на сетевую оптимизацию (например, увеличение пропускной способности сети). Для нашего примера имеем: ЕСЛИ  $\delta < \delta_n$ , ТО  $\rightarrow$  DSR; ЕСЛИ  $\delta_n < \delta < \delta_v$ , ТО  $\rightarrow$  AODV ( $\delta_n, \delta_v$  — нижняя и верхняя границы эффективного применения AODV); ЕСЛИ  $\delta > \delta_v$ , ТО  $\rightarrow$  волновой метод. Пороговые значения  $\delta_n$  и  $\delta_v$  для сетей различной размерности могут быть получены с помощью имитационного моделирования на этапе проектирования сети или «обучением» узлов в процессе их функционирования.

Ситуационное управление маршрутизацией может осуществляться по ряду параметров функционирования сети: типу передаваемой информации, изменению топологии, размерности и площади сети, размеру входящего трафика, плотности размещения узлов и их взаимному расположению, принятым протоколам транспортного и канального уровней.

### ДИНАМИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ МЕТРИК ВЫБОРА МАРШРУТА

Данный подход предполагает активный поиск необходимого маршрута: маршрутное сообщение содержит требования к маршруту в виде параметров (метрик) его выбора, а также программу его обработки.

В большинстве предложенных ММ используется однопараметрическая маршрутизация, которая при выборе кратчайшего пути учитывает только один параметр (обычно — число ретрансляций). Однако требования к передаче пакета, которые могут выражаться такими основными параметрами, как пропускная способность, задержка, число ретрансляций, вероятность доставки, безопасность, определяют и требования к маршруту передачи. Поэтому необходимо говорить об оптимизации данных параметров или о маршруте с заданным качеством обслуживания (Quality of Service, QoS-маршрутизация) [12].

Рассмотрим математическую постановку задачи многопараметрической маршрутизации.

**Модель сети.** Сеть представляется направленным весовым графом  $G = (V, E)$ , где  $V$  — множество случайно расположенных узлов;  $E$  — множество каналов.

Каждый канал  $e = (v_i, v_j) \in E$  и любой узел  $v_j \in V$  могут характеризоваться совокупностью положительных метрик  $c_q(v_i, v_{i+1}), c_q(v_i) \in Z^+, q = \overline{1, Q}$ . Например, значениями  $c_q$  для канала могут быть пропускная способность  $c_1$ , задержка передачи  $c_2$ , мощность передачи узла  $c_3$ , прогнозируемое время существования канала  $c_4$ ; для

узла — оставшаяся емкость батареи  $c_5$ , загрузка (размером свободной очереди)  $c_6$ , мобильность  $c_7$ .

Рассмотрим ациклический путь  $p$  в  $G$  как последовательность узлов  $(v_1, \dots, v_i, \dots, v_n)$ , таких что  $(v_i, v_{i+1}) \in E$  для  $1 \leq i \leq n$ . Очевидно, что стоимость маршрута  $C_q(p)$  может определяться как сумма или минимум (максимум может быть легко превращен в минимум, если, например, вместо  $c_5$  использовать  $1/c_5$ ) значений  $q$ -й метрики составляющих его каналов (и/или узлов):

$$C_q(p) = \sum_{i=1}^{h-1} c_q(v_i, v_{i+1}) \quad \text{для } q = 2, 3, 5;$$

или 
$$C_q(p) = \min_{i \in p} \{c_q(v_i, v_{i+1})\} \quad \text{для } q = 1, 4, 6, 7.$$

В общем случае может быть получено  $P = \{p_k\}$ ,  $k = 1, K$ , маршрутов передачи от отправителя к адресату. В зависимости от цели управления, критерием выбора маршрутов по  $q$ -й метрике является маршрут минимальной  $p_q^* = \arg \min_{p_k \in P} C_q(p_k)$  или требуемой

$$C_q^* \geq \min_{p_k \in P} C_q(p_k) \text{ стоимости.}$$

*Получение многопараметрического маршрута является задачей многокритериальной оптимизации. Получить свертку метрик невозможно ввиду их противоречивости и различной физической природы. Единственное решение — ранжирование метрик в зависимости от требований к качеству маршрута и текущей ситуации на сети.*

### МАРШРУТИЗАЦИЯ С УПРАВЛЕНИЕМ ТОПОЛОГИЕЙ СЕТИ

Для повышения эффективности функционирования МР предлагается функции маршрутизации реализовывать на двух подуровнях: *на верхнем* — осуществлять оперативное управление топологией сети (создавать потенциальные маршруты передачи информации); *на нижнем* — управлять построением и поддержанием маршрутов при полученной топологии (реализовывать конкретный метод из совокупности ММ).

Предполагается, что каждый узел может изменять мощность передачи с определенным шагом дискретизации с увеличением мощности передачи узлов уменьшается число ретрансляций и, соответственно, задержка в передаче сообщения, что приводит, однако, к увеличению уровня взаимных помех и снижению пропускной способности сети.

*Цель управления топологией — нахождение мощности передачи узла, оптимизирующей сетевые характеристики (максимизация пропускной способности сети, минимизация среднего времени доставки сообщений, максимизация времени жизни сети), или достижение пользовательской оптимизации (например, по оперативности доставки сообщений).*

Задача управления топологией МР также может быть сведена к задаче ситуационного управления. Цикл управления топологией включает в себя следующие этапы: сбор информации о состоянии и параметрах функционирования зоны сети; оценка характеристик ее функционирования; нахождение новой топологии (в случае отклонения параметров функционирования от допустимых значений), реализующей цели управления

узла (восстановление связности сети, удовлетворение требований к оперативности доставки сообщений), и выработка управляющих воздействий (изменение мощности передачи узла).

Правила продукционного типа включают в себя условие, описывающее применимость данного правила в зависимости от текущего состояния сети или ее зоны, а также действие, направленное на изменение связности сети с целью сетевой или пользовательской оптимизации. Условием применения правил может быть число соседних узлов [13], взаимный угол расположения узлов [14], общее число узлов в сети и занимаемая площадь [15] и т. д. Все правила, независимо от стратегии, определяют одно из возможных действий — увеличение или уменьшение мощности передачи узлов, что приводит к увеличению или уменьшению числа узлов, принимающих данную передачу.

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ (ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ)

Архитектуру узла, позволяющую реализовать интеллектуальную маршрутизацию, составляют следующие основные блоки: база данных управления, классификатор, планировщик, блок обучения, база знаний, интерпретатор. Рассмотрим возложенные на них функции (рис.2).



Рис. 2. Архитектура узла

*База данных управления (Management Information Base, МІВ) поддерживает в актуальном состоянии модель узла (сети) и может быть формализована по следующим основным группам признаков  $X^l$ ,  $l = \overline{1, L}$  [16; 17]:*

♦ *информационной нагрузке  $X^1$  — тип информации и требования к ее передаче (время доставки, пропускная способность, надежность), интенсивность входящей нагрузки, интенсивность обслуживания, размер свободной очереди, время пребывания пакетов в очереди;*

♦ *маршрутизации  $X^2$  — принятый в настоящий момент метод маршрутизации, объем сетевого служебного трафика в единицу времени и его соотношение с полезным, размеры отказов активных маршрутов, состояние маршрутной таблицы (глубина собранной информации и ее «свежесть», число корреспондирующих пар);*

♦ *структуре  $X^3$  — число соседей узла (при различных мощностях передачи), координаты узлов и их взаимное их расположение (угол, расстояние, нахождение узла в центре сети или на периферии);*

♦ *канальному и физическому уровням  $X^4$  — принятый протокол канального уровня, существующий уровень мощности передачи, качество каналов узла (соотноше-*

ние сигнал/шум, вероятность ошибки, пропускная способность, время задержки, вероятность столкновений пакетов), принятый способ модуляции;

♦ *организационно-техническому*  $X^S$  — принадлежность к иерархии управления (командир, подчиненный), мобильность, оставшаяся емкость аккумуляторной батареи.

С учетом требований по управлению для каждого признака  $X^i_{\psi}$  должны быть заданы его пороговые значения

$$X^i_{\psi}^H < X^i_{\psi} < X^i_{\psi}^B, \quad (1)$$

определяющие состояние узла.

Под ситуацией будем понимать состояние узла  $S^{y3}(t)$  и сети (зоны сети)  $S^{set}(t)$  в момент времени  $t$ . Состояние сети (зоны сети) определяется множеством состояний составляющих ее узлов:  $S^{set}(t) = \{S^{y3}(t)\}$ ,  $i = \overline{1, B}$ . Определим множества  $A_1$  и  $A_2$ , где  $A_1$  — подмножество состояний, удовлетворяющее граничным условиям (1), и  $A_2$  — подмножество состояний, требующих применения управляющих воздействий.

▲ *Классификатор*, на основе поступающей на его вход информации, классифицирует принимаемые сообщения, идентифицирует текущую ситуацию и определяет необходимость управляющего воздействия (множество  $A_2$ ).

▲ *Реально-временные модели* предназначены для расчета времени существования маршрута на основании моделей распространения радиоволн и рельефа местности, характеристик зоны сети (например, пропускной способности, прогнозируемых параметров трафика).

▲ *База знаний продукционного типа*, применяемая для выработки решений по маршрутизации содержит следующую совокупность правил: определения текущей целевой функции управления, выбора методов и функций маршрутизации, определения формата маршрутной информации. Выбор продукционной системы в качестве представления знаний обусловлен ее простотой и независимостью правил.

▲ *Интерпретатор* правил, во-первых, просматривает существующие правила из базы данных и базы знаний, внося в базу данных новые факты, и, во-вторых, определяет порядок их просмотра и применения [9].

Правила базы знаний работают согласно различным стратегиям: одни обнаруживают перегруженный участок сети и пытаются направить сообщения в обход его, другие — недоиспользованные маршруты, чтобы направить трафик по этим путям, а третьи анализируют топологию сети в целях сетевой оптимизации. Для сокращения вывода на правилах, а также выявления конфликтного набора правил в базе знаний необходимо управлять получением решения (применять метаправила). При этом следует различать оптимизацию характеристик сети в целом (зоны сети) и пользовательскую оптимизацию (между парами отправитель—получатель с сохранением некоторого равновесия для всей сети). Поэтому узел

может иметь  $Z_m^{set}(t)$ ,  $m = \overline{1, M}$ , целей управления сетью (например,  $Z_1^{set}(t)$  — максимизация пропускной способности) и  $Z_y^{y3}(t)$ ,  $y = \overline{1, Y}$ , целей управления узлом, направленных на пользовательскую оптимизацию. Цели  $Z_y^{set}(t)$  и  $Z_m^{y3}(t)$  взаимосвязаны. Выбор той или иной цели управления зависит от ситуации и типа передаваемого сообщения на сети, а вывод решения — от ситуации на

сети. Иерархию процесса принятия решения по маршрутизации иллюстрирует рис.3 (анализ состояния узла и сети, определение целевых функций управления, выбор метода маршрутизации, выбор функции маршрутизации, выбор формата маршрутной информации и реализация решения), из которого следует, что этот процесс можно представить в виде взвешенного графа переходов по ситуациям в зависимости от исходной и целевой ситуации.



Рис. 3. Иерархия принятия решения

Предложенная архитектура узла представляет собой фрагмент гибридной экспертной системы реального времени, реализующей систему управления маршрутизацией узла сети.

\*\*\*

Таким образом, в дополнение к традиционным функциям маршрутизации (сбор, хранение маршрутной информации, вычисление маршрута и передача входящего пакета согласно маршрутным таблицам) активная маршрутизация позволяет осуществлять сетевую и пользовательскую оптимизацию за счет адаптации к текущей ситуации на сети и типу передаваемой информации, а также благодаря повышению уровня обоснованности принимаемых маршрутных решений.

#### Литература

1. <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>.
2. Минович А. И., Романюк В. А. Протоколы маршрутизации в мобильных радиосетях // Зв'язок.— № 1.— 2001.— С. 31–36.
3. Broch J., Maltz D.A., Johnson D.B., Hu Y.-C., Jetcheva J. A. Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols // In Proceeding of ACM/IEEE MOBICOM, 1998.— P. 85–97.
4. Романюк В. А. Групповая маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок.— № 6.— 2001.— С. 36–41.
5. Tschudin C., Lundergen H., Gulbrandsen H. Active Routing for Ad Hoc Networks // IEEE Communications Magazine.— 2000.— № 4.— P. 122–127.
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-Ghazaleh N.-B. Active Route Cache Optimization for Ad Hoc Networks // In Proceeding of IEEE INFOCOM, 2002.
8. Papadimitras P., Haas Z.J. Security Routing for Mobile Ad hoc Networks // In Proceedings of Computer Networks and Distributed System (CNDS), 2002.
9. Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем.— СПб.: Питер, 2000.— 384 с.

10. Pearlman M. R., Haas Z. J. Determining the Optimal Configuration for Zone Routing Protocol // *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*.— 17, № 8.— 1999.— P. 1395–1414.

11. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика.— М.: Наука, 1986.— 288 с.

12. Романюк В. А. Маршрутизация интегрального трафика в мобильных радиосетях // *Зв'язок*.— № 2.— 2002.— С. 24–27.

13. Ramanathan R., Rosales-Hain R. Topology Control of Multihop Wireless Networks Using Transmit Power Adjustment // *In Proceedings of IEEE INFOCOM, 2000*.— P. 404–413.

14. Wattenhofer R., Li L., Bahl P., Wang Y.-M. Distributed Topology Control for Power Efficient Operation in Multihop

*Wireless Ad-hoc Networks // In Proceedings of IEEE INFOCOM, 2001.*

15. Narayanaswamy S., Kawadia V., Sreenivas R. S., Kumar P. R. Power Control in Ad-Hoc Networks: Theory, Architecture, Algorithm and Implementation of the COMROW Protocol // *In Proceedings of EuroWireless, 2002.*

16. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы.— СПб.: Питер, 2000.— 672 с.

17. Chen W., Jain N., Singh S. ANMP Ad-hoc Network Management Protocol // *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*.— 17, № 8.— 1999.

