

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

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ В МОБИЛЬНЫХ РАДИОСЕТЯХ

Рассматривается динамическая архитектура мобильных радиосетей (МР), известных как сети MANET — Mobile Ad-Hoc Networks, предполагающая отсутствие базовых станций и фиксированных маршрутов передачи информации.

Весьма широкое распространение сети MANET [1] получили с появлением беспроводных решений (стандарт IEEE 802.11 Wireless Ethernet, технологии HIPERLAN/2, Bluetooth), не требующих сетевой инфраструктуры и использующих нелицензионные полосы частот. Все узлы (хосты) таких сетей мобильны и обмениваются информацией непосредственно между собой или с применением ретрансляции передаваемых пакетов. Под узлом сети понимается радиотерминал (или переносной компьютер, оснащенный радиомодемом) с функциями маршрутизатора. Наиболее характерные примеры сетей MANET — это сеть связи оперативно-тактического звена управления [2], персональные сети связи для офиса, сети радиосвязи, применяемые в чрезвычайных ситуациях, при проведении конференций, олимпиад и т.п. Указанные сети характеризуются:

- ♦ динамичной топологией — узлы сети мобильны, каналы радиосвязи нестабильны, их пропускная способность, а также дальность связи ограничены;
- ♦ ограниченными энергетическими возможностями большинства узлов сети;
- ♦ значительной размерностью (сотни и тысячи узлов) и высокой плотностью размещения узлов на местности.

Одна из главных задач оперативного управления МР — маршрутизация информационных сообщений. Особенности МР обуславливают основные требования к методам маршрутизации: распределенное функционирование, минимальная загрузка сети служебными сообщениями, отсутствие заикливания маршрутов, быстрая сходимость.

Алгоритмы маршрутизации в существующих сотовых сетях мобильной связи (IS-41, GSM, IS-95A [3]), основанные на ведении центром коммутации двух баз данных: положения (HLR — Home Location Register) и перемещения (VLR — Visitor Location Register), являются централизованными и поэтому не могут быть применены в МР. Методы маршрутизации, используемые в МР малой размерности (десятки узлов) [4], не приемлемы для сетей с большим (сотни, тысячи) количеством узлов.

Исследования МР большой размерности [5] показали, что интенсивность потока служебной информации возрастает квадратично (как произведение числа узлов на абсолютную величину топологических изменений). Очевидно, что для таких МР необходимо использовать иерархическое управление, разбив радиосеть на отдельные зоны (кластеры) с выделением главных узлов зоны (ГУЗ), узлов-шлюзов и внутренних узлов (рис. 1). Множество ГУЗ и выделенные узлы-шлюзы образуют в

сети виртуальную магистраль, которая может использоваться как для распространения маршрутной информации, так и для передачи полезной информации, в том числе групповой [6].

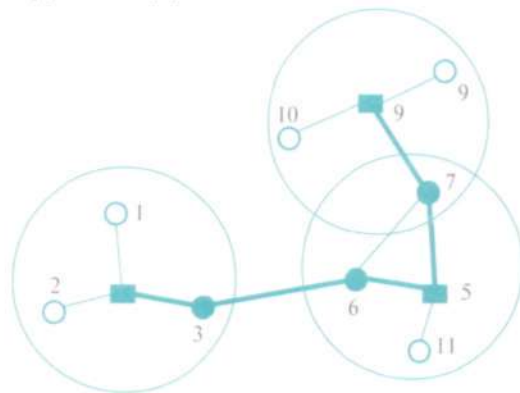


Рис. 1. Иерархическая организация МР: ■ — главные узлы; ○ — внутренние узлы; ● — узлы-шлюзы; — — магистраль

Размер зоны измеряется минимальным числом r_z ретрансляционных участков от ГУЗ до узла-шлюза или ее диаметром d_z (на рис. 1 показаны зоны с $r_z = 1$ и $d_z = 2$). Зоны могут перекрываться, и тогда они имеют общие узлы-шлюзы (узел 7), или не перекрываться (узлы-шлюзы 3, 6).

Классификация вариантов иерархических методов маршрутизации (ИММ) представлена на рис. 2.



Рис. 2. Варианты построения ИММ

С возрастанием числа узлов до нескольких тысяч МР может быть организована как m -уровневая иерархия [5]. Однако поскольку управление сетью при этом значительно усложняется, на практике чаще всего используют двухуровневую организацию сети.

Иерархическая организация МР позволяет:

- ♦ стабилизировать сетевую топологию (параметры r_z , d_z зоны сети изменяются значительно менее динамично, чем связность отдельных узлов);

◆ многократно использовать частотный радиоресурс за счет его пространственного разнесения;

◆ повысить эффективность управления сетью (ГУЗ может более эффективно управлять ресурсами своей зоны, чем центр управления сетью).

Однако для иерархической организации МР требуется решить такие задачи управления сетью:

- динамическое создание и поддержание зон сети;
- динамическая адресация абонентов;
- внутрizonовая и межzоновая маршрутизация пакетов;
- обеспечение живучести сети.

Первая задача иерархического управления — разделение сети на зоны. Решение ее может преследовать различные цели: сосредоточить основной трафик внутри зон сети, минимизировать служебный трафик, минимизировать размеры маршрутных таблиц. Достижение этих целей возможно за счет ограничения количества зон в сети, минимизации межzоновых связей, ограничения числа узлов в зоне или ее размера. С точки зрения маршрутизации такая постановка задачи определяет:

- объем служебного трафика, зависящий от размера маршрутных таблиц, а также от числа и размера маршрутных сообщений;
- изменение длины маршрута.

Математическая постановка задачи. МР представляется в виде ненаправленного весового графа $G = (N, E)$, где N — множество узлов; E — множество каналов, когда известны «стоимости» передачи информации по каналам $w: e \rightarrow \mathbb{R}^+$, $e \in \overline{E}$; максимальная «стоимость» передачи в зоне W_z^{\max} и максимальное число узлов в зоне N_z^{\max} (максимальный размер зоны r_z^{\max}).

Необходимо разбить N на k множеств $N_1, \dots, N_p, \dots, N_k$ так, чтобы связный подграф $G_i = (N_i, E_i) \subseteq G$ удовлетворял следующим условиям:

$$1) \sum_{e \in G_i} w(e) \leq W_z^{\max} \text{ — суммарная стоимость передач в}$$

зоне не должна превышать максимального значения;

$$2) |N_i| \leq N_z^{\max} \text{ (или } r_z \leq r_z^{\max}) \forall i \in \{1, 2, \dots, k\} \text{ — ограничение}$$

числа узлов в зоне (размеров зоны);

$$3) \min \sum_e w(e), e \in E, e \notin E_i, i \in \{1, 2, \dots, k\} \forall k \in$$

$\{2, \dots, |M|\}$ — минимальное число межzоновых связей.

Данная задача относится к классу NP-полных [7]. Для произвольного графа — эффективные алгоритмы ее решения, обладающие всеми перечисленными свойствами, до сих пор не известны. Кроме этого, она требует знания всей информации о состоянии сети (что проблематично в МР), и поэтому для построения зон используют эвристические методы. Предлагаемые эвристические сети должны асинхронно функционировать, генерировать ограниченное число сообщений, удовлетворять некоторым условиям математической постановки задачи.

Чтобы иерархически организовать сеть, можно воспользоваться одним из двух известных распределенных алгоритмов разделения сети на зоны с одновременным формированием главных узлов, внутренних узлов и шлюзов [8; 9]. Предполагается, что каждый узел в сети имеет идентификационный номер (ИН) и, периодически передавая Hello-сообщения, поддерживает связность со

своими соседями; все сообщения передаются правильно; мощность передач узлов одинакова; сетевая топология во время выполнения алгоритма не изменяется. Упомянутые алгоритмы отличаются один от другого критерием выбора главного узла в зоне: минимальный ИН или максимальная степень связности C (число соседних узлов).

Формальное описание базового алгоритма:

▶ каждый узел периодически ширококовешательно передает Hello-сообщения, содержащие список «соседних узлов» (включая себя);

▶ узел, имеющий наименьший среди всех соседних узлов ИН (или максимальную степень связности), становится главным узлом и передает это решение своим соседям (рис. 3);

▶ главный узел, принявший сообщение от узла с \min ИН ($\max C$), передает ему функции главного узла;

▶ узел, принявший сообщение от двух и более главных узлов, становится шлюзом, в остальных случаях узел остается внутренним.

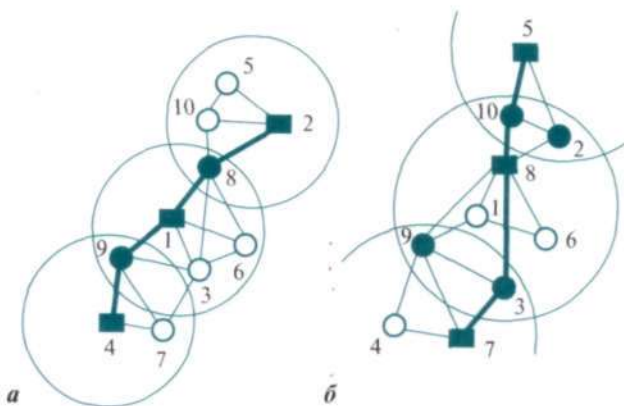


Рис. 3. Результат функционирования алгоритмов формирования зон: а — с минимальным значением ИН; б — с максимальным значением связности (■ — главные узлы; ○ — внутренние узлы; ● — узлы-шлюзы; — — магистраль)

Доказано, что за конечное время сеть будет разделена на зоны (диаметром $d = 2$) и два главных узла никогда не будут связаны непосредственно между собой [9]. Временная сложность алгоритма равна $O(N)$, где N — число узлов МР.

Результат функционирования алгоритмов динамического разбиения сети на зоны иллюстрирует рис. 3. Каждая зона содержит главный узел, внутренние узлы и узлы-шлюзы. Главные узлы в зонах: 1, 2, 4 (5, 7, 8); внутренние узлы: 3, 5, 6, 7, 10 (1, 4, 6); узлы-шлюзы: 8, 9 (2, 3, 9, 10) при различных критериях выбора ГУЗ. На главный узел возлагаются функции распределения частотного ресурса между зонами и распространения маршрутной информации. Каждый узел в зоне располагает информацией об узлах своей зоны. Второй уровень состоит из всех главных узлов первого уровня.

Однако предложенные алгоритмы самоорганизации сети обладают рядом недостатков: зоны формируются в условиях статичной сети, главные узлы распределяются в ней неоднородно. Преимуществом алгоритма разделения сети на зоны по критерию $\max C$ в сравнении с алгоритмом, соответствующим критерию \min ИН, является уменьшение числа формируемых зон, а недостатком — то, что он менее стабилен при возрастании ди-

намики топологии. Поэтому для увеличения стабильности зоны в качестве критерия выбора зоны целесообразно использовать мобильность узла.

Значение мобильности узла можно получить двумя способами. Первый предполагает, что в узле имеется оборудование позиционирования. Второй способ заключается во взаимной оценке мощности сигнала между узлами и получении относительного взаимного перемещения, которое даже предпочтительнее абсолютного значения скорости (часто мобильность узлов носит групповой характер). Мобильность узла i относительно мобильности узла j может быть определена как $M_i(j) = 10 \log P_c(t)/P_c(t + \Delta t)$, где P_c — мощность принимаемого сигнала; Δ — интервал рассылки Hello-сообщений. Если $P_c(t) < P_c(t + \Delta t)$, то $M_i(j) < 0$. Отрицательное значение относительной мобильности указывает на сближение узлов, положительное — на их удаление друг от друга. Значение мобильности узла i , имеющего j -х

соседей, определяется выражением $M_i = \sqrt{\sum_{j=1}^c M_i^2(j)}$.

Малое значение M_i соответствует низкой мобильности узла и наоборот. Для вычисления M_i достаточно двух успешных приемов Hello-сообщений от всех соседних узлов.

Таким образом, все узлы сети вычисляют метрику относительной мобильности, причем минимальное ее значение ($\min M$) используется в качестве критерия выбора главного узла сети. Как показали исследования, благодаря такой метрике можно уменьшить на треть изменение главных узлов сети в условиях ее динамики по сравнению с ранее предложенными метриками.

Кроме мобильности и степени связности каждый узел может характеризоваться еще и такими параметрами, влияющими на процесс иерархической организации сети: мощностью передачи, емкостью аккумуляторной батареи. Например, оптимизировать количество зон и размеры зоны можно изменением мощностей передач узлов (с уменьшением мощностей передач уменьшаются внутрисистемные помехи, повышается разведзащищенность, увеличивается пропускная способность сети, но в тоже время возрастает число зон и, следовательно, повышается нестабильность сети в целом). Поэтому в качестве метрики выбора ГУЗ (веса w_x узла x) предлагается использовать совокупность параметров функционирования этого узла: мобильность, мощность передачи, емкость батареи, степень связности, идентификационный номер. Общая метрика представляет собой свертку названных величин:

$$w_x = \alpha M_x + \beta P_x + \gamma E_x + \eta C_x + \zeta \text{ИН}_x,$$

где $M_x, P_x, E_x, C_x, \text{ИН}_x = 0 \dots 1$ — нормализованные значения мобильности, мощности передачи, емкости батарей, степени связности и идентификационного номера узла; $\alpha, \beta, \gamma, \eta, \zeta$ — коэффициенты, учитывающие значения этих параметров. В зависимости от конкретной цели управления сетью (зоной сети) при выборе ГУЗ предпочтение отдается тому или иному параметру (присвоением значений соответствующих коэффициентов). Критерий выбора ГУЗ — $\max w_x$.

Поддерживать стабильность зоны можно повторением процесса ее формирования, что, однако, неэффективно. С этой целью значительно целесообразнее регулировать мощности передач узлов в зоне, реализуя также следующие «правил поведения» узлов:

- при перемещении внутреннего узла из одной зоны в другую главные узлы в зонах не изменяются;
- если внутренний узел перемещается за пределы существующих зон, он формирует новую зону;
- при перемещении главного узла i в зону главного узла j один из них остается главным узлом, а другой становится внутренним (в результате изменения его веса).

Предложенные алгоритмы разделения сети на зоны эффективны для размерности сети в несколько сот узлов. При дальнейшем увеличении размерности число ГУЗ возрастает и, следовательно, требуется больше времени для самоорганизации сети. Решить эту проблему можно разбиением сети на зоны размерности $r_z = k$. Один из таких алгоритмов предложен в [9]. Основное его отличие от ранее рассмотренных — это построение зоны зондированием каждым узлом сети локальной области на расстоянии k ретрансляционных участков.

Вторая задача иерархического управления — адресация узлов. Для решения предлагается применить динамическую иерархическую адресацию. Каждый узел сети имеет свой идентификационный номер, определяющий его физический так называемый MAC-адрес (MAC — Media Access Control). Такие MAC-адреса различных узлов изображены на рис. 4. Иерархический адрес (ИА) получается конкатенацией адресов иерархий зон. Например, ИА узла 5 равен $\langle 1, 1, 5 \rangle$ (рис. 4, а). ИА позволяет, используя таблицы маршрутизации, направлять пакеты к адресату. Например, передача пакета от узла 5 с ИА $\langle 1, 1, 5 \rangle$ к узлу 9 с ИА $\langle 1, 3, 9 \rangle$ осуществляется по следующему маршруту: 5—1—3—9 (рис. 4). Преимущества таких адресов заключаются в децентрализованной их корректировке та минимизации размеров маршрутных таблиц; недостаток в необходимости корректировки иерархических адресов из-за перемещения узлов.

Третья задача иерархической организации МР — непосредственная маршрутизация пакетов, предполагающая выполнение следующих функций (см. рис. 2):

- сбор информации о состоянии сети и вычисление маршрутов (могут использоваться различные методы маршрутизации: таблично-ориентированные, зондовые и волновые [4]);
- хранение маршрутов (состав маршрутных таблиц ГУЗ, внутренних узлов и шлюзов);
- пересылка пакета (внутри зоны и за ее пределами).

Рассмотрим содержание маршрутных таблиц, число и состав которых изменяются в зависимости от уровня иерархии. Главные узлы поддерживают зондовую таблицу (обо всех узлах своей зоны) и таблицу главных узлов сети такого формата: ИН; следующий узел (шлюз) на пути к адресату; состояние, выраженное числом ретрансляционных участков; последовательный номер маршрута, предназначенный для исключения заикливания маршрутов. Каждый внутренний узел поддерживает только зондовую таблицу. Узлы-шлюзы содержат информацию об узлах смежных зон.

В зависимости от загрузки и производительности магистрали передача пакетов может осуществляться двумя способами:

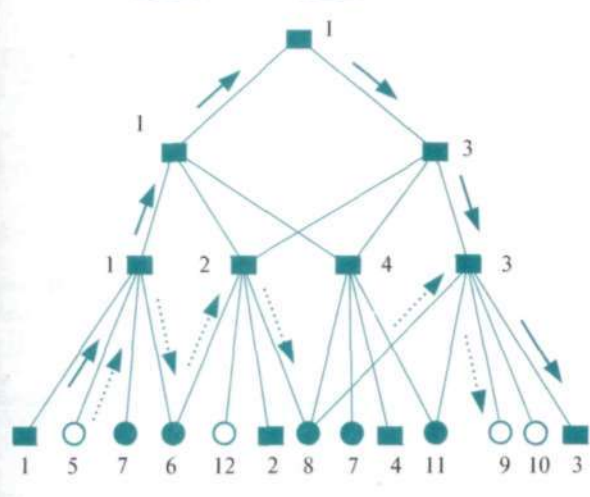
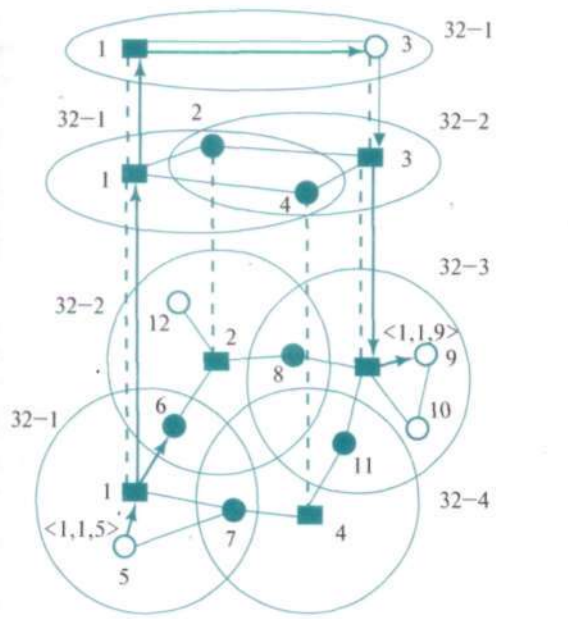


Рис. 4. Процесс передачи пакета: а — трехуровневая организация МР; б — иерархия маршрута (■ — ГУЗ; ○ — внутренние узлы; ● — узлы-шлюзы)

● **Передача по магистрали.** Если отправитель и адресат находятся в одной зоне (отправитель — узел 5; адресат — узел 6). Узел 5 передает узлу 1, узел 1 находит в своей таблице принадлежность узла к своей зоне и пересылает пакет узлу 6 (см. рис. 4, а). Если узлы находятся в разных зонах (отправитель — узел 5; адресат — узел 9), имеем такой маршрут передачи: 5 — 1 — 3 — 9 (рис. 4, б).

● **Передача пакетов без использования магистрали** (произвольным образом).

Для уменьшения загрузки ГУЗ (и магистрали в целом) каждый узел может передавать пакет непосредственно узлу-шлюзу (при условии предварительного обращения внутреннего узла к своему ГУЗ за маршрутом передачи к шлюзу).

Дадим оценку иерархического и неиерархических методов маршрутизации, воспользовавшись алгоритмическим подходом. Каждый метод маршрутизации реализуется совокупностью алгоритмов, которые характеризуются временной, связной и вычислительной сложностью. Временная сложность $t_{п.м}$ — время, необходимое для построения маршрута, связная $V_{с.с}$ — количество служебных сообщений, используемых для построения маршрута, вычислительная $V_{мт}$ — определяется размерами маршрутных таблиц (МТ) и алгоритмом вычисления маршрута.

ростения маршрута, связная $V_{с.с}$ — количество служебных сообщений, используемых для построения маршрута, вычислительная $V_{мт}$ — определяется размерами маршрутных таблиц (МТ) и алгоритмом вычисления маршрута. Рассмотрим двухуровневую организацию сети в предположении «синхронности» выполнения каждого алгоритма маршрутизации, т.е. все узлы сети выполняют один шаг алгоритма одновременно. На каждом шаге узел принимает и обрабатывает все маршрутные сообщения, переданные ему в течение предыдущего шага, и посылает им свое маршрутное сообщение.

Пусть имеются два типа топологических изменений:

■ внутреннее — изменение маршрутной таблицы, касающееся узлов одной зоны (например, отказ внутреннего узла);

■ внешнее — изменение маршрутной таблицы, относящееся ко всем узлам сети (например, отказ ГУЗ или разделение сети на отдельные подсети).

Для маршрутизации пакетов между зонами и внутри них могут использоваться различные методы маршрутизации: таблично-ориентированные (класса Дейкстры или Беллмана — Форда [11]), зондовые или гибридные [4]. Сравнительная характеристика иерархических и неиерархических методов маршрутизации представлена в таблице, где использованы обозначения: * — при каждом топологическом изменении; N — число узлов сети; N_z — среднее число узлов в зоне; C — средняя связность узла; Z — число зон в сети; d — диаметр сети; d_z — средний диаметр зоны, d_b — диаметр магистрали; l — средняя длина кратчайшего пути между узлами одной зоны.

Методы маршрутизации		Наихудший случай		$V_{мт}$
		$V_{с.с}$	$t_{п.м}$	
Неиерархические				
Класс Дейкстры		$O(E)^*$	$O(d)^*$	$O(N^2)$
Класс Беллмана — Форда		$O(N^2)$	$O(N)$	$O(NC)$
Зондовые		$O(N)$	$O(2d)$	$O(NC)$
Иерархические				
Класс Дейкстры	Изменение:			
	внутреннее	$O(N_z C)^*$	$O(d_z)^*$	$O(Z^2 + N_z^2)$
	внешнее	$O(ZC) + O(N_z CZ)^*$	$O(d_b) + O(d)^*$	
Класс Беллмана — Форда	внутреннее	$O(N_z^2)$	$O(N_z)$	$O(N_z + ZC)$
	внешнее (Беллмана — Форда)	$O(N^2)$	$O(N)$	
Гибридный	внешнее (зондирование)	$O(N_z^2)$	$O(N_z)$	$O(N_z + ZC)$
		$O(N)$	$O(2d)$	

Анализ данной таблицы показывает, что применение ИММ позволяет значительно уменьшить служебный трафик в сети (особенно внутризональный). Для уменьшения межзонального служебного трафика маршрутизация пакетов целесообразно осуществлять гибридными методами: между зонами зондовыми, а внутри зоны — таблично-ориентированными методами.

Одним из недостатков ИММ является построение более длинных маршрутов по сравнению с неиерархическими методами маршрутизации. Определим верхнюю границу отношения длины путей при иерархической и неиерархической маршрутизации. Для этого следует доказать две теоремы.

Теорема 1. Если в сети используется ИММ с двухуровневой организацией, то отношение h длины маршрута $L_{ИММ}$ при его использовании к соответствующему кратчайшему маршруту $L_{опт}$ при неиерархической мар-

шрутизации ограничено значением $h = L_{\text{имм}} / L_{\text{опт}} \leq 1 + d_z$, где $d_z \leq 1$ — максимальный диаметр зоны сети.

Теорема 2. Представлена m -уровневая сеть, в которой все зоны 1-го уровня имеют диаметр меньше или равный d_z . Тогда, если $L_{\text{имм}}$ — длина пути между различными узлами в k зонах ($k \leq m$) и $L_{\text{опт}}$ — кратчайшая длина пути между этими узлами, то

$$h = L_{\text{имм}} / L_{\text{опт}} \leq 2^{k-2}(2 + d_z) - 1 \text{ при } 2 \leq k \leq m.$$

Четвертая задача иерархического управления — это обеспечение живучести сети. В случае отказа ГУЗ необходимо назначить новый главный узел и восстановить в нем маршрутные таблицы. В [12] предложено следующее решение: каждый главный узел содержит копии маршрутных таблиц (баз данных) соседних главных узлов. В случае отказа одного из ГУЗ алгоритм формирования зон выбирает новый ГУЗ, затем соседние ГУЗ передают ему сохраненные копии МТ.

* * *

В МР большой размерности (сотни и тысячи узлов) необходимо использовать иерархические методы маршрутизации, позволяющие повысить эффективность использования каналов (за счет уменьшения объемов служебного трафика, передаваемого в сети) и решить проблему адресации мобильных абонентов (с помощью динамической иерархической адресации). Зоны сети необходимо формировать на базе многопараметрического критерия, учитывающего условия функционирования сети. Выбор конкретной реализации иерархического метода маршрутизации будет определяться размерами сети, а также трафиком и мобильностью.

Литература

1. Internet Engineering Task Force (IETF) Mobile Ad Hoc Network (MANET) Working Group Charter, <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. Грамаков Ю. А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи.— М.: Эко-Трендз, 1997.— 238 с.
4. Миночкин А. И., Романюк В. А. Протоколы маршрутизации в мобильных радиосетях // Зв'язок.— 2001.— № 1.— С. 31–36.
5. Шахам Н., Уэсткотт Д. Тенденции развития архитектуры и протоколов систем пакетной радиосвязи // ТИИЭР.— 1987.— Т. 75, № 1.— С. 100–119.
6. Романюк В. А. Методы групповой маршрутизации в мобильных радиосетях // Зв'язок.— 2001.— № 6.
7. Krishnan R., Ramanathan R., Steensrup M. Optimization Algorithms for Large Self-Structuring Networks // IEEE INFOCOM'2000.— 2000.
8. Эфремидес Э., Уизелтир Д. Э., Бейкер Д. Д. Вопросы проектирования надежных мобильных радиосетей, использующих методы передачи и приема сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты // ТИИЭР.— 1987.— Т. 75.— № 1.— С. 68–90.
9. Gerla M., Lin C. R. Adaptive clustering for mobile wireless networks // Journal on Selected Areas in Communications, v. 17, no. 7, 1997.— P. 1265–1275.
10. Amis A.D., Prakash R., Vuong T.H., Huang D.T. Max-Min D-Cluster Formation in Wireless Ad hoc Networks // IEEE INFOCOM'2000.— 2000.
11. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных.— М.: Мир, 1989.— 544 с.
12. Liang B., Haas Z. J. Virtual Backbone Generation and Maintenance in Ad Hoc Network Mobility Management // IEEE INFOCOM'2000.— 2000.