

МАРШРУТИЗАЦИЯ В МОБИЛЬНЫХ РАДИОСЕТЯХ – ПРОБЛЕМА И ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Рассматриваются мобильные радиосети (МР) или MANET (Mobile Ad-Hoc Networks) [1] – динамическая самоорганизующаяся архитектура построения сетей, предполагающая отсутствие фиксированной сетевой инфраструктуры (базовых станций) и централизованного управления. Особую привлекательность данные сети получили с появлением недорогих беспроводных стандартов и технологий (IEEE 802.11, HIPERLAN/2, Bluetooth) [2]. Узлы сети мобильны. Под узлом сети понимается коммуникатор (КПК с радиомодемом) с функциями маршрутизатора.

Классическими областями применения мобильных радиосетей являются поле боя и чрезвычайные ситуации; другие сценарии включают – дом и офис, конференция, виртуальный класс, мобильные роботы и т.п.

Особенностями МР являются: динамичная топология; ненадежность и динамичность радиоресурса, коллективный характер его использования; ограниченность и неоднородность ресурсов узлов (энергоёмкость батарей, производительность процессоров, объем памяти и т.д.); ограниченная безопасность и др. Обеспечить эффективное управление МР невозможно без соответствующей системы управления [3]. Одной из основных задач оперативного управления МР является маршрутизация информационных сообщений.

Методы маршрутизации (ММ), применяемые в стационарных сетях связи [4], ориентированы на статичную сетевую топологию и не эффективны в МР. За последние несколько лет для использования в МР предложено значительное количество ММ [5, 6]. Однако постоянный технологический прогресс в области микроэлектроники, необходимость предоставления новых услуг и новые сферы применения МР вызывают необходимость разработки новых эффективных методов маршрутизации. *Целью статьи* является классификация методов маршрутизации в МР, их краткий анализ и разработка методологии их синтеза.

Все методы маршрутизации, предложенные для применения в МР, можно классифицировать по следующим признакам (рис. 1) [7]:

- по способу построения и поддержания маршрутов: таблично-ориентированные (далее табличные), зондовые и гибридные;
- по числу получателей: однопользовательские, групповые и “волновые”;
- по количеству и типу параметров в метрике выбора маршрута: однопараметрические и многопараметрические; энергосберегающие, с заданным качеством обслуживания и др.
- по количеству маршрутов: однопутевые и многопутевые;
- по типу маршрутов: симметричные и асимметричные.
- по наличию оборудования позиционирования: координатные и некоординатные;
- по организации сети: иерархические и неиерархические (одноуровневые);
- по принятию решений по маршрутизации: пассивные и активные (интеллектуальные).



Рис. 1. Классификация методов маршрутизации в МР

Задачей метода маршрутизации является создание, хранение и поддержание маршрута(ов) передачи между отправителем и адресатом заданного качества (обычно кратчайшего). Кратчайший маршрут определяется как функция минимальной стоимости маршрута, определяемая как сумма стоимостей всех каналов маршрута. При этом методы маршрутизации должны [7,8]:

- соответствовать особенностям МР;
- удовлетворять ряду обязательных (опционных) требований $\{TR_q\}$, $q=1 \dots Q$. Например, TR_1 – децентрализованное функционирование (обязательно); TR_2 – быстрая сходимость и отсутствие закливания маршрутов (обязательно); TR_3 – минимальная загрузка сети служебной информацией (выступает целевой функцией); TR_4 – получение маршрута по мере необходимости (режим «молчания» сети); TR_5 – обеспечение нескольких маршрутов доставки информации к адресату; TR_6 – обеспечение маршрутов заданного качества (по производительности, задержки и др.); TR_7 – поддержка однонаправленных каналов; TR_8 – минимизация расходуемой мощности узлов, оснащенных батареями; TR_9 – безопасность процессов маршрутизации и др.

Синтез ρ -го метода маршрутизации в МР должен включать синтез следующих основных функций и алгоритмов их реализации $U_\rho = \{U_\rho^c, U_\rho^x, U_\rho^b, U_\rho^p, U_\rho^d\}$, $\rho=1 \dots P$ (рис. 2) [7]:

– U_ρ^c – сбор и рассылка маршрутной информации: по охвату сети (глобальный – о состоянии всей сети или локальный – в пределах определенного количества ретрансляционных участков); по типу (по мере необходимости, периодический или по событиям; пассивный и активный); по объему (формату) маршрутных сообщений (зондов), определяющий количество контролируемых параметров сети; по способу рассылки (волновой, зондовый, табличный, гибридный); по процедуре обработки маршрутной информации в узлах сети и т.д.;

– U_ρ^x – хранение маршрутной информации (количество, состав маршрутных таблиц, место их хранения) может осуществляться автономно или распределенно (несколькими узлами);

– U_ρ^b – вычисление маршрутов может осуществляться на основе использования: алгоритмов вычисления кратчайших путей (Беллмана-Форда или Дijkstra), зондирования сети, информации о координатах узлов;

– U_ρ^p – ретрансляция (передача) пакета: последовательная (любой промежуточный узел маршрута имеет право на его изменение), «источником» (отправитель фиксирует маршрут передачи), многопутевая (по нескольким маршрутам), групповая (по групповому маршруту), волновая.



Рис. 2. Синтезируемые функции методов маршрутизации в МР

Кроме этого, каждый класс методов маршрутизации может потребовать разработки дополнительных алгоритмов управления сетью – U_ρ^d . Например, иерархические методы требуют решения задач кластеризации и адресации сети; методы групповой маршрутизации – разработки алгоритмов построения и поддержания групповых маршрутов передачи информации; методы координатной маршрутизации – алгоритмов оперативного управления топологией и т. д.

Синтез единого метода маршрутизации, осуществляющего пользовательскую и сетевую оптимизацию, удовлетворяющего всем условиям функционирования МР и, соответственно, всем требованиям $\{TR_q\}$, $q=1 \dots Q$ не представляется возможным. Поэтому решение проблемы маршрутизации необходимо декомпозировать на задачи, т.е. разработку новых методов маршрутизации необходимо производить по классам, каждый из которых удовлетворяет типу трафика, имеющемуся оборудованию в узлах и условиям функционирования МР (рис. 3).



Рис. 3. Схема системного анализа и синтеза ММ в МР

Рассмотрим подробнее предложенную классификацию. По способу построения и поддержания маршрутов методы маршрутизации делятся на три класса: таблично-ориентированные, зондовые и гибридные (рис. 3) [7].

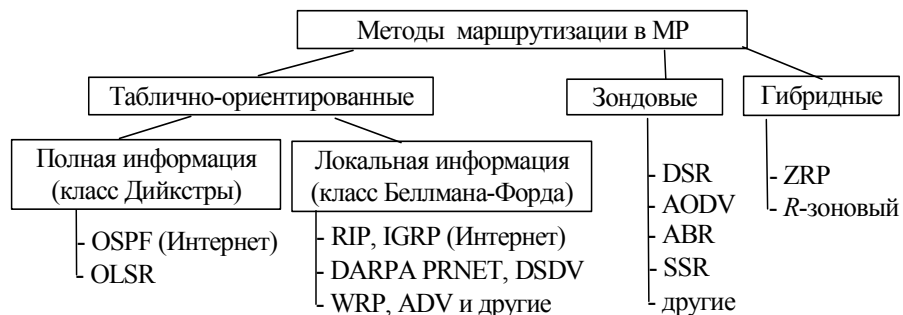


Рис. 3. Основные классы методов маршрутизации в МР

Таблично-ориентированные (proactive) методы маршрутизации

Для табличных ММ известны два подхода для вычисления кратчайшего пути в сети (в зависимости от того, какой информацией располагает узел о состоянии сети) [9].

1. Каждый узел сети владеет полной информацией о состоянии сети (класс "Link-State").

В этом случае каждый узел использует централизованный алгоритм поиска кратчайшего пути Дийкстры. Так работает в сети Интернет протокол OSPF (Open Shortest Path First) [4], который можно классифицировать как табличный, однопользовательский, многопараметричный, однопутевый. Способы реализации его функций: рассылка маршрутной информации – волновая, охват – глобальный, тип – по событиям и периодический; маршрутная таблица размера N^2 (где N – число узлов) хранится в каждом узле; ретрансляция пакетов – последовательная. Недостатки: высокие требования к аппаратным ресурсам, требует начальной синхронизации, наличие hello-пакетов,

значительный служебный трафик и др. Для MP предложена его модификация – метод OLSR (Optimized Link State Routing). Его основное отличие – использование волнового алгоритма для сокращения количества передач при рассылке маршрутных сообщений. Недостатки: значительный служебный трафик при высокой динамике топологии сети, высокая вычислительная сложность при использовании нескольких метрик для выбора маршрута с ростом размерности сети и др.

2. Каждый узел сети располагает локальной информацией о состоянии сети (класс "Distance-Vector").

Данный класс методов реализован на основе распределенной версии алгоритма Беллмана-Форда, который сегодня используется в Интернет в протоколах RIP (Routing Information Protocol) и IGRP (Interior Gateway Routing Protocol). Представителями данного класса методов в MP являются DARPA PRNET (Packet Radio Networks), DSDV (Destination Sequenced Distance Vector), WRP (Wireless Routing Protocol), ADV (Adaptive Distance Vector Routing) [5, 6, 10] и др. Данные методы предполагают ведение каждым узлом одной или нескольких таблиц, хранящих информацию о маршрутах доставки информации по всем адресатам сети. Всегда присутствует основная таблица – маршрутная. Рассмотрим ее содержание на примере DARPA PRNET [10]. Каждый маршрут хранится в виде отдельного входа: адресат (j), соседний узел (N_j) в кратчайшем маршруте передачи к адресату и стоимость маршрута (C_j) (рис. 4). Стоимость маршрута предполагает сумму метрик каждого канала. В качестве метрики обычно используется число ретрансляционных участков, но могут быть задержка доставки пакетов, качество канала и другие.

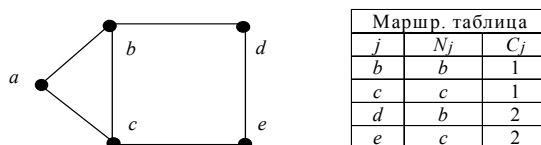


Рис. 4. Пример маршрутной таблицы для узла a

Каждый узел периодически рассылает маршрутные сообщения, содержащие измененные входы маршрутных таблиц, своим соседям. Приняв маршрутное сообщение, узел i модифицирует свои входы маршрутных таблиц по формуле: $C^{(p)}(i, j) = \min_k [c(i, k) + C^{(p-1)}(k, j)]$, где $C^{(p)}(i, j)$ – стоимость кратчайшего пути от узла i к адресату j на p -ой итерации, $c(i, k)$ – стоимость передачи по каналу (i, k) , $k \in N_i$ – сосед.

После корректировки маршрутных таблиц узел рассылает маршрутные сообщения своим соседям.

Недостатком данного класса методов является необходимость решения так называемой проблемы "конечного счета". Алгоритм требует большего количества итераций для сходимости (в наихудшем случае N итераций, где N – число узлов сети), вызывает заикливание маршрутов, в некоторых ситуациях генерирует большее количество маршрутных сообщений.

DSDV исключает заикливание маршрутов за счет их нумерации [11]. В WRP решает проблему "конечного счета" на основе поддержания в таблицах информации об узле, предшествующему адресату в маршруте передачи. Особенности ADV – поддерживаются маршруты только к активным узлам, частота и объем маршрутной информации адаптируются к условиям функционирования сети.

Зондовые (reactive) методы маршрутизации

Представители: DSR (Dynamic Source Routing), AODV (Ad Hoc On-Demand Distance Vector), TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm), ABR (Associativity-Based Routing), SSR (Signal Stability Routing) и другие [5, 6]. Основное отличие зондовых методов маршрутизации от табличных – узлы строят маршруты по мере необходимости путем рассылки по сети специальных пакетов (зондов-запросов) и сбора зондов-ответов, содержащих информацию о возможных маршрутах передачи информации. Зондовая маршрутизация предполагает два основных этапа функционирования: создание маршрута и его поддержание в актуальном состоянии.

1. Создание маршрута. Отправитель (узел 1), не имея маршрута к адресату и желая передать ему пакет (узлу 8), широковещательно передает зонд-запрос, содержащий идентификаторы отправителя и адресата (рис. 5). Узел, принявший зонд-запрос, проверяет наличие запрашиваемого

маршрута к адресату. При его отсутствии он добавляет свой идентификатор (метод DSR) или изменяет “идентификатор следующего узла в пути к адресату” (метод AODV) в поле зонда-запроса и передает его далее своим соседям. Иначе (или при достижении зондом-запросом адресата) – отправителю посылается зонд-ответ с указанием кратчайшего маршрута в виде последовательности узлов (DSR) или идентификатора следующего узла передачи (метод AODV). Отправитель, получив зонд-ответ, помещает маршрут в свой кэш (DSR) или таблицу (AODV). Промежуточные узлы, обрабатывающие зонды, сохраняют полученные маршруты к адресату и отправителю (происходит процесс обучения маршрутам).

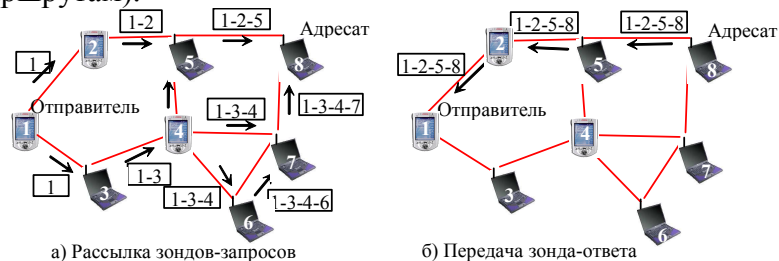


Рис. 5. Этап создания маршрута (метод DSR)

2. Поддержание маршрута может осуществляться двумя способами: активным и пассивным. В первом случае, если промежуточный узел k обнаружил отказ канала (который является составной частью маршрута для i -го узла), то он посылает зонд-отказ узлу i . При получении отправителем зонда-отказа инициируется создание нового маршрута. Во втором случае, узел может прослушивать наличие ретрансляций соседом и осуществлять пассивный контроль наличия маршрута на расстоянии одного ретрансляционного участка.

AODV хранит маршрутную информацию в виде таблиц и периодически обменивается с соседями hello-сообщениями. Формат зондов включает поле “следующий идентификатор на пути к адресату”. Недостаток: наличие постоянного служебного трафика.

TORA – каждый узел строит весовой направленный ациклический граф с корнем в узле-отправителе и тупиковой вершиной в узле-адресате. Функционирование метода включает три этапа: создание маршрута, его поддержание и уничтожение. Достоинство: обеспечение нескольких маршрутов доставки информации к адресату; недостаток: необходимость временной синхронизации узлов, возможны временные “колебания маршрутов” и др.

ABR в качестве метрики выбора маршрутов использует стабильность радиоканала, определяемая числом принятых за определенное время сигналов “присутствия” соседей. Достоинства: выбор более стабильных маршрутов приводит к меньшему числу перестроений маршрутов. Недостатки: выбранные маршруты не являются кратчайшими, необходимость постоянной передачи сигнала “присутствия”.

SSR выбирает маршрут, используя временной и энергетический параметры: продолжительность существования канала и мощность сигнала. Каждый узел содержит сигнальную и маршрутную таблицы. Достоинство: выбирает более стабильные маршруты; недостатки: промежуточные узлы не могут сообщить отправителю об имеющемся маршруте к адресату, что приводит к значительной задержке при построении маршрута; не всегда выбираются кратчайшие маршруты.

Общая сравнительная характеристика зондовых и табличных методов представлена в табл. 1.

Таблица 1

Методы маршрутизации Характеристика	Зондовые	Таблично-ориентированные
Построение маршрутов	К определенным узлам по мере необходимости на основе зондирования сети (-) Задержка в получении маршрута (+) Построение по мере необходимости	Постоянно, каждым узлом ко всем узлам на основе обмена маршрутными таблицами и вычисления маршрута (+) Маршрут выбирается без задержки (-) Постоянный служебный трафик
Объем служебного трафика: – высокая динамика топологии – низкая динамика топологии	(+) меньше (-) больше	(-) больше (+) меньше

Эффективность зондовой маршрутизации может быть улучшена следующими способами [12]:

- локальное зондирование (ограничение зоны рассылки зондов предельной величиной);
- селективный выбор узлов для ретрансляции зондов за счет применения волновых методов передачи;
- двухэтапное построение адресатом маршрута заданного качества;
- упреждающее построение нового маршрута;
- обучение маршрутам и их оптимизация;
- построение маршрутов (зондирование) адресатом.

К настоящему времени для стандартизации группой IETF (Internet Engineering Task Force) предложены методы OLSR, DSR, AODV [6].

Гибридные методы маршрутизации

Представители ZRP (Zone Routing Protocol) [6], R -зоновый [13] и др. Данные методы предполагают выделение каждым узлом маршрутной зоны (R_{M3} – число ретрансляций). Построение и поддержание маршрутов к адресатам, находящимся внутри маршрутной зоны, осуществляется табличным (периодическая корректировка маршрутных таблиц), а за ее пределами – зондовыми методами (рассылка зондов-запросов и сбор зондов-ответов). Иллюстрация маршрутных зон для узлов 10 и 23 со значением $R_{M3}=2$ представлена на рис. 6. Узлы 3, 5, 12, 14, 16, 19 являются периферийными для узла 10, а узлы 6, 19, 22 – для узла 23.

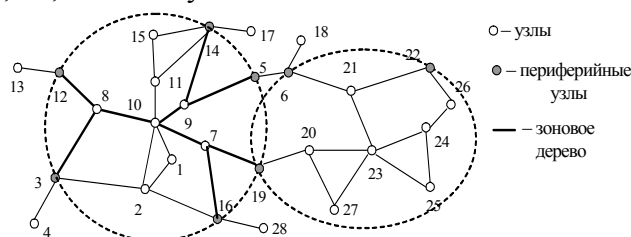


Рис. 6. Маршрутные зоны для узлов 10 и 23 ($R_{M3}=2$)

Достоинство гибридных методов – это уменьшение служебного трафика за счет адаптации размеров R_{M3} к ситуации на сети, применения волновых алгоритмов для рассылки маршрутной информации внутри маршрутной зоны и локализации рассылки в маршрутной зоне зондов-запросов по так называемому зондовому дереву (корень в данном узле, концевыми вершинами являются периферийные узлы – рис. 6). Размер маршрутной зоны $R_{M3}=f(v, N)$ должен адаптироваться к динамике топологии v (больше v – меньше значение R_{M3} и наоборот) и размерности сети N . При $R_{M3}=0$ гибридный метод маршрутизации будет функционировать как зондовый, при $R_{M3}=d$ (где d – диаметр сети) – как табличный. Общий объем служебного трафика $V_{ст}$ равен сумме внутризонального $V_{вт}$ и межзонального $V_{мт}$. Так как корректировка маршрутных таблиц осуществляется локально (в пределах R_{M3}), то объем $V_{вт}=f(R_{M3}, v_{M3})$ зависит от размера зоны и интенсивности изменения топологии внутри зоны и не зависит от размерности сети.

Формальная постановка проблемы маршрутизации представлена в [7]. Если при статической маршрутизации используются, как правило, общесетевые критерии и производится сетевая оптимизация, то при динамической (а в МР еще и децентрализованной адаптивной) маршрутизации применяются индивидуальные критерии и происходит выбор оптимального маршрута с точки зрения пользователя при ограничениях на объем служебного трафика.

Методы групповой (multicast) маршрутизации в МР

При необходимости передачи в сети информации от одного абонента к нескольким получателям возникает необходимость групповой маршрутизации. На сегодня предложено значительное количество методов групповой маршрутизации (МГМ), предназначенных для использования в МР [14]: AMRIS (Ad-hoc Multicast Routing Protocol), MAODV (Multicast Ad-hoc On-demand Distance Vector Routing), AMRoute (Ad-hoc Multicast Routing), ODMRP (On-Demand Multicast Routing Protocol), CAMP (Core-Assisted Mesh Protocol), NSMP (Neighbor Supporting Ad hoc Multicast

Routing Protocol) и др. Данные МГМ можно классифицировать по следующим признакам (рис. 7): критерию выбора маршрута, структуре группового маршрута (ГМ), способам их построения и поддержания, степени зависимости от однопользовательской маршрутизации.



Рис. 7. Классификация методов групповой маршрутизации в МР

Общая характеристика МГМ представлена в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика МГМ	AMRoute	ODMRP	AMRIS	CAMP	MAODV	NSMP
Структура ГМ	Дерево	Сеть	Дерево	Сеть	Дерево	Сеть
Зацикливание ГМ	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Зависимость от однопользовательской маршрутизации	Да	Нет	Нет	Да	Да	Нет
Построение ГМ	З	З	З	Т	З	З
Поддержание ГМ	Т, Г, П	З, О	З, Г, О	Т, Г, П	З, Г, П	З, О

Обозначения: З, Т – процесс построения ГМ осуществляется зондированием или табличным методом; Г – наличие главного узла в ГД; П, О – поддержание маршрута ориентировано на получателя или отправителя.

Проведенный анализ МГМ также продемонстрировал зависимость их эффективности от текущей ситуации в сети. Так при высокой динамике топологии необходимо использовать МГМ строящие групповые маршруты в виде подсети, при низкой – в виде дерева [14].

Методы волновой (flooding) маршрутизации

Фундаментальным сервисом МР является волновой метод передачи (ВМП) информации из-за широковещательной природы радиоканала. ВМП применяется при передаче однопользовательской и многоадресной информации в условиях высокой динамики топологии сети, а также на этапах построения и поддержания маршрутов при зондовой маршрутизации. Общий алгоритм функционирования ВМП заключается в следующем: узел-отправитель широковещательно передает пакет своим соседям; каждый соседний узел, приняв пакет впервые, ретранслирует его. Для исключения повторной ретрансляции пакета каждый узел хранит определенное время информацию о нем в виде: номер пакета и идентификатор узла отправителя. Процесс продолжается до тех пор пока все узлы сети не получат данный пакет. Достоинства ВМП: простота реализации, децентрализованная реализация, отсутствие служебного трафика, высокая надежность доставки информации. Однако основным недостатком ВМП является резкий рост трафика, приводящий к увеличению столкновений пакетов и резкому снижению пропускной способности сети.

В настоящее время предложено значительное количество волновых алгоритмов (ВА), позволяющих уменьшить количество ретрансляций пакетов при ВСП и тем самым повысить его эффективность [15]. С точки зрения теории графов данная задача интерпретируется следующим образом: вычислить наименьшее связное доминирующее множество узлов сети для ретрансляции сообщений. Для ее решения необходимо знание информации о связности всей сети, что для МР невозможно. Так как данная задача относится к классу NP-полных, то получение точного решения за приемлемое время возможно лишь при ограниченной размерности сети. Для ее решения предложен ряд приближенных решений, реализованных в волновых алгоритмах, классификация которых и оценка эффективности представлена в [15].

Методы многопараметрической маршрутизации

Представим МР в виде графа $G=(V,E)$ с множеством вершин $V=\{v_i\}$ и множеством ребер E . Обозначим ациклический маршрут t в G как последовательность узлов $(v_1, \dots, v_i, \dots, v_h)$, таких, что

$(i, i+1) \in E$ для $1 \leq i \leq N$. Каждый канал $(i, i+1) \in E$ и узел $v_i \in V$ могут характеризоваться совокупностью положительных метрик $c_\eta(i, i+1)$, $c_\eta(v_i) \in Z^+$ или их сверткой $\Xi(c_\eta)$, $\eta = \overline{1, N}$. Например, значениями c_η для канала могут быть: наличие радиосвязности – c_1 , пропускная способность – c_2 , задержка передачи – c_3 , мощность передачи – c_4 , расстояние – c_5 , прогнозируемое время существования канала – c_6 и т.д.; для узла: оставшаяся емкость батареи – c_7 , загрузка (размер свободной очереди) – c_8 , скорость – c_9 и др.

Очевидно, что стоимость маршрута $C_\eta(m)$ может определяться как сумма или минимум (максимум может быть легко превращен в минимум, например, вместо c_7 необходимо использовать $1/c_7$) значений η -ой метрики каналов (и/или узлов) его составляющих

$$C_\eta(m) = \sum_{i=1}^{h-1} c_\eta(i, i+1) \text{ для } \eta=1,3,4,5,7; C_\eta(m) = \min_{i \in p} \{c_\eta(i, i+1)\} \text{ для } \eta=2,6,8,9.$$

Пользовательская оптимизация основана на алгоритмах вычисления $(U_\rho^B, \rho = \overline{1, P})$ маршрута минимальной “стоимости” – m^* :

– при однопараметрической маршрутизации

$$m_\rho^* = \arg \min_{m \in M} C_\eta(m) \text{ для } \eta=1,3,4,6 \text{ и } m_\rho^* = \arg \max_{m \in M} C_\eta(m) \text{ для } \eta=2,5,7,8;$$

– при многопараметрической маршрутизации $m_\rho^* = \arg \min_{m \in M} \Xi C_\eta(m)$, $\eta = \overline{1, N}$, где Ξ – свертка,

M – множество всех возможных маршрутов от l -го отправителя k -му адресату.

Примеры выбора маршрутов по метрикам, учитывающим расход энергоресурса узлов при передаче/приеме сообщений и/или емкость батарей можно найти в [16]. Представителями **энерго-сберегающих методов маршрутизации** для МР также являются: PARO (Power-Aware Routing Optimization Protocol), EADSR (Energy Aware Dynamic Source Routing Protocol), PAMAS (Power Aware Multi Access Protocol with Signalling Ad Hoc Networks) и др.

Маршрутизация с заданным качеством обслуживания (QoS-маршрутизация)

Различные типы трафика предъявляют различные требования к качеству маршрута передачи [17]. На сегодня предложены QoS-версии значительного числа методов маршрутизации. В табличных методах QDSDV и OLSR в качестве метрик выбора маршрута предложено использовать значения пропускной способности, максимального времени задержки передачи сообщений и осуществлять резервирование маршрута. Однако вычисление кратчайших маршрутов с более чем одной метрикой является NP-полной задачей. Поэтому для их нахождения предлагается использовать эвристики.

В зондовом методе QAODV поля зондов-запросов включают значения максимальной задержки передачи и минимальной пропускной способности. В [18] предложен метод многопутевой зондовой маршрутизации для МР с гибридным разделением каналов (TDMA/CDMA), включающий следующие этапы построения маршрутов: рассылка отправителем зондов-запросов, собирающих информацию о свободных слотах узлов; поиск адресатом маршрута(ов) заданной пропускной способности на основе информации, полученной из принятых зондов-запросов; резервирование маршрута(ов) передачи (посылка адресатом зондов-ответом по выбранным маршрутам с требованием резервирования ресурсов узлов и каналов).

Проведенный анализ эффективности методов QAODV, QDSR, QOLSR [19] при различных условиях функционирования сети также показал наличие границ их эффективного применения.

Методы многопутевой маршрутизации

Применение многопутевой маршрутизации (построение нескольких независимых маршрутов передачи информации от отправителя к адресату) позволяет увеличить надежность доставки информации (при отказе одного маршрута используется альтернативный), сократить объем служебной информации (реже осуществляется перестроение маршрута), уменьшить время и повысить безопасность доставки информации (при распределении входящей нагрузки по нескольким независимым маршрутам) [20].

На сегодня предложены многопутевые версии для ряда рассмотренных ранее методов маршрутизации. Например, MDSR (Multipath DSR) предполагает, что адресат ожидает приема множества зондов-запросов, выделяет альтернативные пути (если такие имеются) и направляет по ним адресату зонды-ответы. Однако MDSR не предусматривает механизмов построения независимых путей передачи.

SMR (Split Multipath Routing) стремится получить хотя бы два независимых пути передачи за счет многократной (в отличие от DSR) передачи промежуточными узлами сети зонда-запроса пришедшего различными путями (дубликаты зонда-запроса не уничтожаются, а посылаются по исходящим каналам при условии, что длина полученного маршрута меньше, чем ранее принятых). Основной недостаток SMR – это значительный рост служебного трафика.

В [20] предложен один из методов многопутевой многопараметрической маршрутизации, повышающий вероятность построения нескольких независимых маршрутов передачи на основе анализа адресатом полученного дерева маршрутов и рассылки зондов-ответов общим узлам маршрутов, заставляя их осуществлять поиск других маршрутов.

Методы асимметричной маршрутизации

MP может быть неоднородной по мощности передачи узлов (транспортное средство – пешеход). В такой сети будет существовать определенное количество асимметричных (однонаправленных) радиоканалов. При значительном количестве в сети асимметричных каналов целесообразно их использование для построения маршрутов. Решение данной задачи предполагает следующие этапы [21]:

1. Обнаружение узлом асимметричных каналов;
2. Построение альтернативного маршрута, позволяющего замкнуть цикл между узлами в асимметричном канале;
3. Туннелирование квитанции и маршрутной информации.

Методы иерархической маршрутизации

Исследования MP большой размерности показали, что даже незначительное повышение динамики топологии сети приводит к значительному росту служебного трафика. Интенсивность потока служебной информации возрастает квадратично (произведение числа узлов на величину топологических изменений). Очевидно, что для решения этой проблемы необходимо ввести иерархическое управление MP – провести разбиение MP на отдельные зоны (кластеры) с выделением главных узлов зоны (ГУЗ), узлов-шлюзов и внутренних узлов [22]. Множество ГУЗ и выделенные узлы-шлюзы образует в сети виртуальную магистраль, которая может использоваться как распространения маршрутной информации, так и для передачи полезной информации. Варианты построения методов иерархической маршрутизации представлены на рис. 8. С ростом количества узлов (несколько тысяч) MP может быть организована в m -уровневой иерархии. Однако это значительно усложняет процесс управления сетью. Поэтому на практике чаще используют 2-х уровневую организацию сети.



Рис. 8. Особенности реализации методов иерархической маршрутизации

Иерархическая организация MP позволяет:

- увеличить стабильность сетевой топологии (динамика изменения зоны сети значительно ниже динамики изменения связности для отдельных узлов сети);

- многократно использовать частотный (кодový) радиоресурс за счет его пространственного разнесения;
- повысить эффективность управления сетью (ГУЗ может эффективней управлять ресурсами своей зоны по сравнению с центром управления сетью).

Однако иерархическая организация сети усложняет процесс управления сетью и предполагает решения следующих задач: динамическое создание и поддержание зон сети; динамическую адресацию абонентов; внутрizonовую и межzоновую маршрутизацию пакетов; восстановление управления зоной вследствие отказа (уничтожения) ГУЗ.

Представителями методов иерархической маршрутизации являются: FSR (Fisheye State Routing protocol), LANDMAR (Landmark Routing Protocol for Large Scale Networks), HSR (Hierarchical State Routing protocol) и др.

Методы координатной (географической, geographic) маршрутизации

Наличие в узлах сети системы позиционирования (например, GPS) позволяет использовать координатную информацию для выбора маршрутов. Примерами методов координатной маршрутизации являются: LAR (Located-Aided Routing) – зондовый, DREAM (Distance Routing Effect Algorithm for Mobility) – табличный; GeoGRID (Geographical GRID), GeoTORA (Geographical TORA) – методы групповой маршрутизации; ZHLS (Zone-Based Hierarchical Link State Routing), GRID (Geographic Location Service) – методы иерархической маршрутизации и др.

Например, метод GRID предполагает введение иерархии в сети, логически разделенной на квадраты (каждый из которых пронумерован). Координаты узла находятся в соответствии с координатами квадрата. В каждом квадрате один из узлов становится главным. На него возлагаются функции сбора координатной информации сети, распространения ее в квадрате и функции ретрансляции пакета.

Особенность координатной маршрутизации – вычисление маршрутов (выбор ретрансляторов) происходит на основе знания узлами информации взаимного местоположения (рис. 9). Построение маршрутов и передача информации может осуществляться правилами случайного или фиксированного выбора [23]: ближайший к адресату (GEDIR, GEographical DIstance Routing); с наибольшим продвижением к адресату (MFR, Most Forward within Radius); ближайший к передающему узлу в направлении адресата (NFR, Nearest Forward within Radius); с минимальным углом в направлении адресата (Compass); выбор двух ретрансляторов, расположенных по внешней стороне направленного сектора и ближайших к адресату (V-GEDIR) и др.

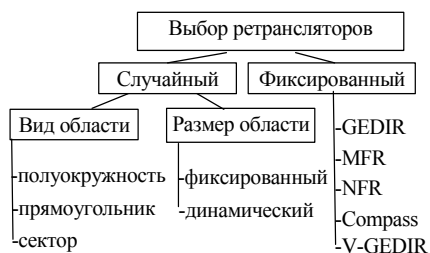


Рис. 9. Особенности функции передачи пакетов при координатной маршрутизации

Управление выбором ретранслятора происходит за счет управления мощностью передачи и/или диаграммы направленности антенн, т.е. фактически происходит управление топологией сети. Поэтому управление топологией МР должно рассматриваться как составная часть системы управления маршрутизацией [24].

Активная (интеллектуальная) маршрутизация

Проведенные исследования [25, 26] показали, что каждый из методов маршрутизации эффективен (достигается оптимум одного или нескольких показателей эффективности функционирования сети) при определенной ситуации в сети. Например, при малой динамике топологии сети эффективны табличные ММ, при средней – зондовые, при высокой – волновые. В условиях большой входной нагрузки предпочтительны табличные методы, низкой – зондовые. В свою очередь каждый из зондовых методов характеризуется особенностями реализации, что и определяет различ-

ные диапазоны их эффективного применения. Таким образом, *единого метода маршрутизации, удовлетворяющего всем требованиям и обеспечивающего оптимизацию всех показателей эффективности функционирования сети при различных условиях ее работы, не существует* [27]. Для решения данной проблемы предлагается реализовать так называемую “активную” маршрутизацию, которая предусматривает следующие подходы (в отличие от традиционных ММ):

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

Для этого предлагается выделить в системе управления сетью [3] подсистему управления маршрутизацией, реализованную в каждом узле МР (рис. 11).

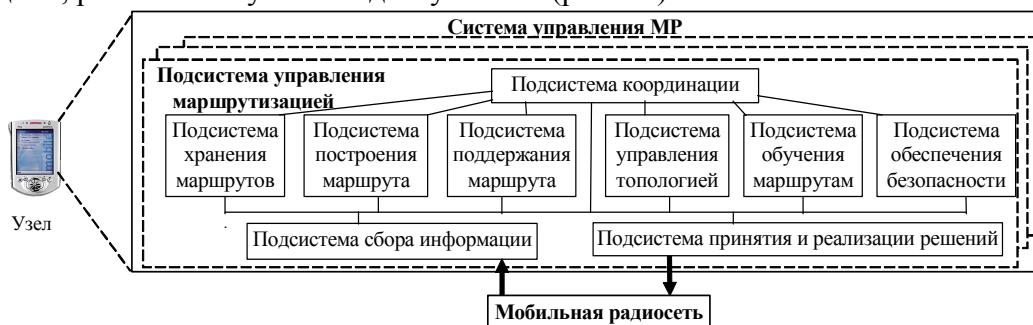


Рис. 11. Функциональная модель системы управления маршрутизацией в МР

Подсистемы сбора информации, построения и хранения маршрутов узла осуществляют рассылку, сбор и хранение информации о сети (ее зоны) по правилам функционирования соответствующего метода маршрутизации.

Подсистема принятия и реализации решения [3] на основе анализа собственного состояния, параметров функционирования сети или ее зоны (мобильность, нагрузка и др. – задаются в виде нечетких переменных) и типа трафика определяет: целевую функцию управления, метод маршрутизации (количество адресатов определяет выбор однопользовательской, групповой или волновой маршрутизации; требования надежности и безопасности – количество маршрутов – однопутевую и многопутевую и т.д.), функцию маршрутизации, формат маршрутной информации и т.д. Получение многопараметрического маршрута сведено к задаче нечеткой многокритериальной оптимизации. Иерархия процесса принятия решения по маршрутизации показана на рис. 12.

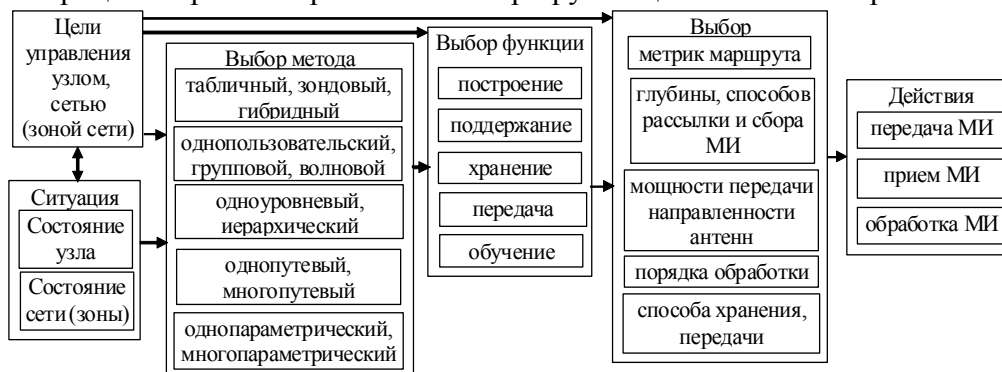


Рис. 12. Иерархия принятия решения по маршрутизации

Подсистема управления топологией перераспределяет мощности передач соседних узлов и/или направленности их антенн исходя из целевой функции управления. Задача управления топологией сведена к задаче ситуационного управления [24].

Подсистема поддержания маршрута функционирует в пассивном (отправителю посылается сообщение об отказе маршрута) или активном (прогноз состояния маршрутов и, при необходимости, упреждающее построения нового участка маршрута) режимах.

Подсистема обучения маршрутам использует информацию из проходящих через узел пакетов (служебных и информационных) для пополнения (обновления) маршрутной таблицы.

Подсистема обеспечения безопасности предполагает идентификацию атак противника на методы маршрутизации, оценку их угроз и обеспечивает меры по их минимизации.

Подсистема координации осуществляет координацию действий всех подсистем и прогнозирование поведения маршрутов.

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

Безопасность маршрутизации

Обеспечение безопасности процесса маршрутизации предполагает идентификацию потенциальных атак противника, оценку их угроз и уязвимости используемых протоколов маршрутизации. Уязвимость маршрутизации в МР определена особенностями данной сети.

Атаки, направленные на протоколы маршрутизации, можно классифицировать как: внешние и внутренние, пассивные и активные. Защита от внешних атак включает шифрование передаваемой маршрутной информации и обеспечение различных сервисов безопасности. Возможные способы защиты от внутренних атак (при наличии в сети скомпрометированных узлов) предполагают: разделение информации на части и их передача по независимым маршрутам, обнаружение скомпрометированных узлов и исключение их из процесса маршрутизации за счет применения узлами систем обнаружения вторжения [28].

Пассивные атаки осуществляются путем прослушивания радиоэфира и сбора маршрутной информации с целью вскрытия топологии сети и способов ее адресации. Они не нарушают нормальную работу протоколов маршрутизации, однако их почти невозможно обнаружить.

Активные атаки направлены на частичную или полную дезорганизацию работы сети путем ввода в сеть повторной (устаревшей) или ложной (измененной) маршрутной информации (МИ). Например, атака типа “отказ в обслуживании” может быть легко реализована модификацией одного или нескольких полей маршрутного сообщения (зонда): адреса отправителя, числа ретрансляций, номера сообщения и самого маршрута передачи. Результатами активных атак могут быть: перенаправление маршрутов (и, соответственно, трафика), зацикливание маршрутов, создание перегрузки в узлах сети, переполнение маршрутных таблиц, имитация разделения сети на отдельные подсети, увеличение времени доставки сообщений и т. д. Защита от активных атак должна предусматривать аутентификацию и целостность маршрутной информации.

Определим основные требования к безопасной маршрутизации в МР как невозможность противником: фальсифицировать адрес отправителя МИ; внедрять в сеть ложную МИ; изменять МИ в процессе ее ретрансляции; формировать маршрутные циклы; перенаправлять маршрут; определять сетевую топологию из МИ. Неавторизованные узлы должны быть исключены из процесса вычисления и построения маршрутов.

Существующие беспроводные протоколы реализуют централизованные схемы обеспечения безопасности и эквивалентны механизмам безопасности проводных сетей. Однако данные централизованные решения не приемлемы в МР. Для МР предложен ряд методов маршрутизации, обеспечивающих некоторые сервисы безопасности: ARAN (Authenticated Routing for Ad-hoc Networks), SAR (Security Aware ad hoc Routing), SAODV (Security AODV), SRP (Security Routing Protocol), SEAD (Security efficient ad hoc distance vector routing protocol), SPREAD (Security Protocol for REliable dAta Delivery) и др.

В целом обеспечение сервисов безопасности является более сложной задачей по сравнению со стационарными сетями связи из-за необходимости построения эффективной распределенной системы управления ключами и децентрализованной системы обнаружения вторжений [28].

Методика оценка эффективности методов маршрутизации в МР

Постановка задачи. Заданы: мобильная радиосеть, множество $MM \{U_p\}$, $p=1 \dots P$, предлагаемых для реализации, требования к методам маршрутизации $\{TP_q\}$, $q=1 \dots Q$.

Необходимо: оценить эффективность предложенных методов маршрутизации и дать рекомендации по их применению в данной сети.

Этапы методики.

1. Анализ функционирования МР и задание исходных данных:

• Параметры МР:

- размерность сети (число узлов сети, ее диаметр и площадь);
- параметры узлов сети, описанные на различных уровнях: физическом (частота, вид модуляции, мощность передатчика, параметры антенн и т.д.), канальном (методы доступа и организации радиоканала – частотный, временной, кодовый и др.), сетевом (исследуемый метод маршрутизации U_p , метод управления нагрузкой и др.), транспортном; аппаратурном (объем буферов, производительность процессора и т.п.); оперативном (соотношения количества узлов по величине мобильности, времени их работы в режиме “молчания” и др.);
- параметры радиоканалов: скорость передачи, соотношение симметричных и асимметричных каналов и др.;
- параметры топологии: исходная топология, тип местности, средняя степень связности узла сети, величина топологических изменений сети ν , сценарии ее поведения и др.

– параметры информационного обмена в сети: требования к качеству информационного обмена; $\Gamma = \|g_{ij}^{\xi}(t)\|$ – значение входящей нагрузки между i -м и j -м абонентами сообщениями ξ -го типа.

- Параметры исследуемого множества ММ: $\{U_{\rho}\} = \{U_{\rho}^c, U_{\rho}^x, U_{\rho}^b, U_{\rho}^p, U_{\rho}^d\}$, $\rho = 1 \dots P$.

2. Выбор показателей эффективности функционирования ММ.

Показатели эффективности методов маршрутизации целесообразно разбить на три группы: глобальные, локальные и эксплуатационно-финансовые.

Глобальные показатели. Маршрутизация выступает в роли подсистемы системы управления МР и поэтому необходимо оценивать ее эффективность по показателям функционирования самой сети, таких как:

– пропускная способность – $S = V_{\text{дис}}/V_{\text{гис}}$ ($S = N_{\text{дис}}/N_{\text{гис}}$), где $V_{\text{дис}}$ – объем (количество) доставленных адресатам с заданным качеством $N_{\text{дис}}$ информационных сообщений, $V_{\text{гис}}$ ($N_{\text{гис}}$) – объем (количество) сгенерированных отправителями информационных сообщений;

– среднее время задержки передачи сообщений – $\bar{t}_z = \sum_{i=1}^{N_{\text{дис}}} t_{\text{дис } i} / N_{\text{дис}}$, где $t_{\text{дис } i}$ – время доставки i -го информационного сообщения;

– эффективность использования служебных сообщений $\delta = V_{\text{сс}}/V_{\text{дис}}$ ($N_{\text{сс}}/N_{\text{дис}}$), где $V_{\text{сс}}$ ($N_{\text{сс}}$) – объем (количество) служебных сообщений, переданных в сети. Заметим, что к служебной информации относится не только служебные пакеты (маршрутные сообщения, зонды, квитанции, hello-сообщения), а также информация в заголовках пакетов;

– оптимальность маршрута $m_o = \sum_{N_{\text{дис}}} (l_{\text{дис}} - l_{\text{кр}})/N_{\text{дис}}$, где $l_{\text{дис}}$ – длина маршрута для доставлен-

ных адресату $N_{\text{дис}}$ информационных сообщений, $l_{\text{кр}}$ – кратчайший маршрут, полученный с помощью алгоритма Дейкстры.

Локальные показатели. Методы маршрутизации требуют дополнительных временных затрат и ресурсов сети для передачи служебной информации, а также ресурсов хранения и вычисления маршрутов. Поэтому для сравнения ММ можно использовать следующие локальные показатели:

– R^1 – время, необходимое для построения маршрута (временная сложность метода) – данный параметр особенно важен для зондовых методов маршрутизации.

– R^2 – количество (объем) служебных сообщений, используемых для построения маршрута (связная сложность метода);

– R^3 – размеры маршрутных таблиц и алгоритм вычисления маршрутов (вычислительная сложность метода).

К третьей группе следует отнести *экономические и эксплуатационные показатели*. Они характеризуют финансовые затраты на разработку программного обеспечения маршрутизаторов, их развертывание и эксплуатацию.

3. Проверка исходного множества ММ $\{U_\rho\}$, $\rho=1\dots P$ на удовлетворение требований $\{TR_q\}$, $q=1\dots Q$ и формирование допустимого множества $\{U_\rho\}_{\text{доп}}$.

4. Оценка локальных показателей эффективности ММ (временная, связанная и вычислительная сложность метода) множества $\{U_\rho\}_{\text{доп}}$ и выбор эффективного метода в своем классе [29].

Модель сети: сеть представляется ненаправленным графом $G = (N, L)$, где N – число узлов, L – число каналов, d – ее диаметр. Допущения: идентичность маршрутных решений каждого метода после топологического изменения в сети, передача служебных сообщений без ошибок, корректировка маршрутных таблиц происходит “синхронно”.

– вычисление (доказательство) значений локальных показателей ρ -го ММ при топологическом изменении в сети – $R_\rho^j = O(y_\rho^j(x))$, где $y(x)$ – многочлен и $x = (N, L, d)$.

– сравнение методов маршрутизации в отношении преимущества: $R^2 \succ R^1 \succ R^3$ (критерием эффективности является следующее соотношение: если $R_l^j < R_k^j$ при одинаковых маршрутных решениях, то l -й метод эффективнее k -го по j -му показателю) и определение множества предпочтения $\{U_\rho\}_{\text{пр}} \subseteq \{U_\rho\}_{\text{доп}}$.

5. Построение имитационных моделей: модели функционирования МР, моделей функционирования методов маршрутизации $\{U_\rho\}_{\text{пр}}$ [26].

6. Планирование экспериментов и реализация плана экспериментов (получение зависимостей глобальных показателей эффективности S , t_3 , δ , m_0 при различных условиях функционирования сети – N, v, g, \bar{c})

7. Анализ и интерпретация результатов моделирования. Выбор наиболее эффективного (оптимального) ММ осуществляется по следующим критериям: $\max S$, $\min \bar{t}_3$, $\min V_{\text{сс}}/V_{\text{дис}}$, $\min m_0$ на различных интервалах изменения условий функционирования сети.

Выводы. В статье проведена классификация методов маршрутизации, предложенных для применения в мобильных радиосетях, и дана их краткая характеристика. Произведена декомпозиция проблемы маршрутизации в МР на задачи. Разработку новых методов маршрутизации необходимо производить по классам, каждый из которых удовлетворяет типу трафика, имеющемуся оборудованию в узлах и условиям функционирования МР. Рассмотрены схема системного анализа и синтеза методов маршрутизации и методика оценки их эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романюк В.А. Мобильные радиосети – перспективы беспроводных технологий // Сети и телекоммуникации. – 2003. – № 12. – С. 62 – 68.
2. Григорьев В.А., Лагутенко О.И., Распаев Ю.А. Сети и системы радиодоступа. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 384 с.
3. Миночкин А.И., Романюк В.А. Методология оперативного управления мобильными радиосетями // Зв'язок. – 2005. – № 2. – С. 53 – 58.
4. Кульгин М. Технологии корпоративных сетей. – СПб: Издательство “Питер”, 2000. – 704 с.
5. Миночкин А.И., Романюк В.А. Протоколы маршрутизации в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2001. – №1. – С. 31 – 36.
6. <http://www.ietf.org/html/charters/manet-charter.html>.
7. Романюк В. А. Постановка проблеми маршрутизації інформаційних потоків у мережах радіозв'язку з динамічною топологією // Збірник наукових праць № 1. – К.: ВІПІ НТУУ “КПІ”. – 2003. – С. 112 – 119.
8. RFC 2501. Mobile Ad hoc Networking: Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations, 1999.
9. Романюк В.А. Управление построением маршрутов для сети с динамической топологией // Управляющие системы и машины. – 1993. – № 2. – С. 81 – 86.
10. Труды института инженеров по электронике и радиотехнике (ТТИЭР), т.75, №1, 1987.
11. Миночкин А.И., Романюк В. А. Маршрутизация в мобильных радиосетях // Сети и телекоммуникации. – 2002. – № 1. – С. 42 – 47.
12. Миночкин А.И., Романюк В.А., Скрыпник Л.В. Способы повышения эффективности функционирования зондовой маршрутизации в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2003. – № 6. – С. 46 – 49.
13. Романюк В. А. R-зонавий метод маршрутизації в автоматизованих мережах радіозв'язку // Збірник наукових праць № 3. – К.: КВІУЗ. – 2001. – С. 182 – 186.
14. Романюк В.А. Групповая маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2001. – № 6. – С. 36 – 41.
15. Романюк В.А. Волновая маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2003. – № 4. – С. 44 – 46.

16. Минович А.И., Романюк В.А. Управление энергоресурсом мобильных радиосетей // Зв'язок. – 2004. – № 8. – С. 50 – 53.
17. Минович А.И., Романюк В.А. Управление качеством обслуживания в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2005. – № . – С. – .
18. Романюк В.А. Маршрутизация интегрального трафика в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2002. – № 2. – С. 24 – 27.
19. Novatnack J., Greenwald L., Arora H. Evaluating Ad hoc Routing Protocols with Respect to Quality of Service // In Proceedings of WIMOB, 2005.
20. Минович А.И., Романюк В.А. Многопутевая маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2004. – № 6.
21. Романюк В.А. Асимметричная маршрутизация в мобильных радиосетях MANET // Зв'язок. – 2003. – № 3. – С. 28 – 30 .
22. Романюк В.А. Иерархическая маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2002. – № 1. – С. 38 – 42.
23. Романюк В.А. Геомаршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2001. – № 5. – С. 37 – 39.
24. Минович А.И., Романюк В.А. Управление топологией мобильной радиосети // Зв'язок. – 2003. – № 2. – С. 28 – 33.
25. Hsu J., Bhatia S., Tang K. Performance of mobile ad hoc networking routings protocols in large scale scenarios // In Proceedings Military Communication (MILCOM), 2004.
26. Міночкін А.І., Романюк В.А. Імітаційне моделювання та аналіз мобільних радіомереж // Збірник наукових праць № 3. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2003. – С. 97 – 101.
27. Романюк В.А. Активная маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2002. – № 3. – С. 21 – 25.
28. Міночкін А.І., Романюк В.А. Виявлення атак у мобільних радіомережах // Збірник наукових праць № 1. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2005. – С. 102 – 111.
29. Красиловець Л.В., Романюк В.А. Проблемы управления сетями пакетной радиосвязи с промежуточным хранением информации и мобильными абонентами // Кибернетика и системный анализ. – 1996. – № 5. – С. 159 – 168.