

С.Г. БУНИН, А.П. ВОЙТЕР, М.Е. ИЛЬЧЕНКО, В.А. РОМАНИЮК

**САМООРГАНИЗУЮЩИЕСЯ
РАДИОСЕТИ
СО СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫМИ
СИГНАЛАМИ**



Бунин С.Г., Войтер А.П., Ильченко М.Е., Романюк В.А. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами. — К.: НПП "Издательство "Наукова думка" НАН Украины". — 444 с.: ил.

В монографии описаны принципы, особенности построения и функционирования нового класса сетей — самоорганизующихся стационарных и мобильных сетей радиосвязи (Ad Hoc и MANET). Рассматривается возможность использования в таких сетях импульсных сверхширокополосных сигналов. Приведены основные свойства, параметры и примеры возможной реализации самоорганизующихся радиосетей (военного, промышленного и домашнего назначения). Изложены теоретические основы и примеры решения задач управления радиосетями (процедуры доступа в радиоканал, маршрутизация и ретрансляция пакетов, интеллектуализация управления сетями) на канальном сетевом и прикладном уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем. Рассмотрены принципы, примеры построения и реализации приемопередающих устройств сверхширокополосной радиосвязи.

Для научных работников и специалистов в области радиосвязи, аспирантов и студентов, изучающих соответствующие курсы в высших учебных заведениях.

У монографії описано принципи, особливості побудови і функціонування нового класу мереж — стаціонарних і мобільних мереж радіозв'язку із самоорганізацією (Ad Hoc і MANET). Розглядається можливість використання в таких мережах імпульсних надширокополосних сигналів. Наведено основні властивості, параметри та приклади можливої реалізації радіомереж із самоорганізацією (військового, промислового та домашнього призначення). Викладено теоретичні основи та приклади розв'язання задач управління радіомережами (процедури доступу в радіоканал, маршрутизація і ретрансляція пакетів, інтелектуалізація управління мережами) на каналному, мережевому та прикладному рівнях еталонної моделі взаємодії відкритих систем. Розглянуто принципи, приклади побудови і реалізації приймально-передавальних пристроїв надширокополосного радіозв'язку.

Для науковців і фахівців у галузі радіозв'язку, аспірантів і студентів, що вивчають відповідні курси у вищих навчальних закладах.

Principles, features of construction and functioning of a new class of networks — self organized stationary and mobile radio networks (Ad Hoc and MANET) are described in the book. Usage of impulse ultra wide band signals (IR-UWB) in such networks is examined. Basic properties, parameters and examples of possible realizations of self organized radio networks (military, industrial and domestic) are shown. Theoretical bases and examples of management decisions in the radio networks (procedures of multiple access in a radio channel, routing and packet relays, artificial intelligence of the network management) are expounded on physical, network and application levels of the open systems interconnection (OSI) model. Principles, examples of construction and realization of ultra wide band radio transceivers are considered.

This book can be useful to researchers and specialists in fields of radio communications, to the graduate and distance learning students in colleges and universities.

Рецензенты:

академик НАН Украины А.В. Палагин
доктор технических наук, профессор Л.Н. Беркман

Научно-издательский отдел физико-математической и технической литературы

Редактор В.В. Верощка

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
ВВЕДЕНИЕ	8
Список литературы	15
ГЛАВА 1. Основные свойства, параметры и примеры самоорганизующихся радиосетей	17
1.1. Классификация, параметры самоорганизующихся сетей	17
1.2. Сферы применения самоорганизующихся сетей	18
1.2.1. Сети радиосвязи тактического звена управления	19
1.2.2. Меш-сети	26
1.2.3. Сенсорные сети	34
1.2.4. Автомобильные сети	39
1.2.5. Гибридные сети	40
1.3. Преимущества и перспективы самоорганизующихся сетей	41
1.4. Выводы	45
Список литературы	45
ГЛАВА 2. Маршрутизация в самоорганизующихся радиосетях	48
2.1. Анализ методов маршрутизации	48
2.1.1. Анализ методов маршрутизации в стационарных сетях	48
2.1.2. Схема системного анализа и синтеза методов маршрутизации в СРС	57
2.2. Методы однопользовательской маршрутизации информационных потоков в сетях с динамической топологией	64
2.2.1. Таблично-ориентированные методы маршрутизации	65
2.2.2. Оценка эффективности таблично-ориентированных методов маршрутизации	70
2.2.3. Зондовые методы маршрутизации	72
2.2.4. Оценка эффективности зондовых методов маршрутизации	75
2.2.5. Гибридный метод маршрутизации	80
2.3. Методы групповой маршрутизации	84
2.3.1. Анализ методов групповой маршрутизации	84
2.3.2. Оценка эффективности методов групповой маршрутизации	90
2.4. Волновые алгоритмы передачи информации	94
2.5. Методы иерархической маршрутизации в радиосетях большой размерности	98
2.5.1. Алгоритмы динамического создания и поддержания зон сети	100
2.5.2. Динамическая адресация абонентов сети	104
2.5.3. Маршрутизация пакетов	106
2.5.4. Оценка эффективности методов иерархической маршрутизации	107
2.6. Многопутевая маршрутизация	108
2.7. Маршрутизация интегрального трафика	112
2.8. Асимметричная маршрутизация	114
2.9. Безопасность маршрутизации	118
2.10. Имитационное моделирование методов маршрутизации	120

2.11. Предложения по реализации методов маршрутизации	125
2.12. Выводы	131
Список литературы	133
ГЛАВА 3. Ретрансляция в самоорганизующихся сетях	137
3.1. Ретрансляция в сетях Ad Hoc	137
3.2. Одночастотные дуплексные ретрансляторы и сети на их основе	138
3.3. Сравнительный анализ эффективности применения различных типов ретрансляторов	152
3.4. Выводы	155
Список литературы	156
ГЛАВА 4. Управление доступом к радиоканалу	157
4.1. Принципы проектирования MAC уровня	157
4.2. Методы и средства конкурентного использования радиоканала	163
4.3. MAC-уровень в СРС	185
4.3.1. Математическая модель влияния скрытых абонентов	186
4.3.2. Методы и средства компенсации влияния скрытых абонентов	190
4.4. Самоорганизация на MAC-уровне	194
4.4.1. Адаптивное управление задержкой передачи	195
4.4.2. Управление жесткостью протокола МДКН	199
4.4.3. Влияние длины пакета на пропускную способность MAC-уровня	203
4.4.4. Адаптивное управление переменной длиной пакетов	207
4.5. Методы и средства локализации конфликтов	216
4.5.1. Структурная локализация конфликтов	217
4.5.2. Временная локализация конфликтов	220
4.5.3. Динамическая локализация конфликтов	222
4.6. Приоритетный доступ на MAC-уровне	227
4.6.1. Временной приоритетный доступ	227
4.6.2. Двухпротокольный приоритетный доступ	229
4.7. MAC-уровень для сегментов сети с большим интервалом уязвимости	234
4.7.1. Протокол MAC-уровня для спутниковых радиосетей	235
4.7.2. Протоколы MAC-уровня для сетей регионального масштаба	239
4.8. Выводы	246
Список литературы	248
ГЛАВА 5. Интеллектуализация управления самоорганизующимися радиосетями	255
5.1. Особенности управления самоорганизующимися сетями	255
5.2. Основные подходы по интеллектуализации управления радиосетями	259
5.3. Этапы цикла оперативного управления	262
5.4. Функциональная модель системы управления	267
5.5. Управление качеством обслуживания	274
5.5.1. Особенности управления качеством обслуживания в самоорганизующихся радиосетях	274
5.5.2. Методы QoS-управления на физическом уровне	276
5.5.3. Методы QoS-управления на канальном уровне	276

5.5.4. Методы QoS-управления на сетевом уровне	281
5.5.5. Методы QoS-управления на транспортном уровне	284
5.5.6. Методы QoS-управления на прикладном уровне	285
5.6. Интеллектуальный метод маршрутизации в самоорганизующихся сетях.....	287
5.7. Выводы	300
Список литературы	301
ГЛАВА 6. Импульсные сверхширокополосные сигналы	305
6.1. Общая характеристика импульсных сверхширокополосных сигналов	305
6.2. Свойства импульсных сверхширокополосных сигналов	309
6.3. Практическое применение IR-UWB-сигналов в настоящее время	316
6.4. Некоторые способы увеличения дальности связи при существующих ограничениях	322
6.5. Принципы построения устройств радиосвязи на импульсных сверхширокополосных сигналах	323
6.5.1. Передатчики импульсных сверхширокополосных сигналов	323
6.5.2. Приемники импульсных сверхширокополосных сигналов	326
6.5.3. Сверхширокополосные антенны	342
6.5.4. Ретрансляторы IR-UWB-сигналов	345
6.6. Энергетика каналов связи с импульсными сверхширокополосными сигналами.....	347
6.7. Выводы	363
Список литературы	363
ГЛАВА 7. Сети на основе импульсных сверхширокополосных сигналов	365
7.1. MAC-уровень I-UWB сетей	365
7.1.1. Особенности проектирования I-UWB сетей	365
7.1.2. Классификация MAC-протоколов для UWB сетей	368
7.1.3. Протокол контролируемого доступа на основе CDMA	370
7.1.4. Превентивный и адаптивный MAC-протокол	376
7.1.5. Протокол MAC на основе CDMA и кодового брокера	387
7.1.6. Многоканальный протокол множественного доступа PSMA	397
7.1.7. Протокол множественного доступа с сигналом "занято" BSMA	401
7.1.8. Многополосный MAC-протокол	405
7.1.9. MAC-протокол с управлением параметрами связи	413
7.1.10. Децентрализованный MAC-протокол с динамическим канальным кодированием	419
7.2. Координатная маршрутизация в I-UWB сетях	424
7.3. Выводы	433
Список литературы	435
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ	438

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данная книга посвящена проблеме построения самоорганизующихся безинфраструктурных стационарных (Ad Hoc) и мобильных (MANET) радиосетей с элементами искусственного интеллекта. Рассмотрены возможности и перспективы использования в этих радиосетях импульсных сверхширокополосных сигналов (I-UWB), позволяющих улучшить их пропускную способность.

Монография состоит из введения и семи глав.

Во *введении* дается определение самоорганизующихся радиосетей (СРС), история их возникновения и эволюция, а также выделяются особенности архитектуры и некоторые нерешенные проблемы создания сетей данного класса.

В *первой главе* рассмотрены классификация, параметры и сферы применения СРС.

Вторая глава посвящена проблеме маршрутизации в самоорганизующихся сетях. Выполнен сравнительный анализ различных классов методов (протоколов) маршрутизации – табличных, зондовых, гибридных – и предложена методика оценки их эффективности. Рассмотрена совокупность методов и алгоритмов передачи многоадресной информации – методы групповой маршрутизации и волновые алгоритмы передачи информации в СРС.

Для реальных условий функционирования СРС предложена совокупность многопараметрических методов, обеспечивающих пользовательскую оптимизацию: методы многопутевой маршрутизации, метод асимметричной маршрутизации (при условии наличия неоднородных радиоканалов), а также метод маршрутизации интегрального трафика (позволяет обеспечить построение и поддержание маршрутов заданного качества для передачи различных типов информации).

Для СРС большой размерности (сотни и тысячи узлов) рассмотрена иерархическая маршрутизация. Предложены новые критерии и алгоритм кластеризации сети, способы внутризонавой и межзонавой маршрутизации сообщений.

Предложен новый подход (“активная” маршрутизация), предполагающий функционирование в сети множества методов маршрутизации, динамическое формирование метрик выбора маршрута, управление топологией сети как составной частью маршрутизации, интеллектуализацию процессов принятия решения по маршрутизации.

В *третьей главе* изложены особенности ретрансляции в сетях Ad Hoc, подробно описаны теоретические основы и практическая реализация одночастотного дуплексного ретранслятора, а также приведены теоретические исследования эффективности различных способов ретрансляции.

В *четвертой главе* рассмотрены методы и принципы проектирования средств управления доступом к радиоканалу, учитывающие специфику СРС. Предложен ряд новых протоколов управления доступом, обеспечивающих самоорганизацию и компенсирующих влияние скрытых абонентов, осуществляющих адаптивное управление задержкой передачи и пропускной способности радиоканала путем вариации длины пакетов данных, а также обеспечивающих приоритеты в условиях конкурентного доступа. Проанализированы методы и средства локализации конфликтов в СРС. Предложены методы приоритетного обслуживания в условиях конкурентного доступа к радиоканалу. Для СРС с орбитальными ретрансляторами дан

новый протокол доступа с адаптивной загрузкой канала, обеспечивающий существенное превышение приведенной средней скорости передачи по сравнению с протоколом асинхронного резервирования.

В *пятой главе* рассмотрена методология решения проблемы управления самоорганизующимися радиосетями. Для этого произведена декомпозиция проблемы (по функциям и уровням эталонной модели) на задачи, определены требования к методам управления в СРС и предложены основные направления решения задач анализа и синтеза управления данными сетями.

Показано, что обеспечение заданного качества обслуживания в СРС должно осуществляться по функциям с их реализацией на всех уровнях эталонной модели под управлением выделенной QoS-подсистемы, основным элементом которой является база знаний.

Показано, что интеллектуализация системы управления СРС позволит оптимизировать процесс управления данной сетью на основе анализа и учета ситуации, сложившейся в сети (информационном направлении), а также требований по передаче определенных типов трафика; минимизировать ошибки, вызванные человеческим фактором в ходе принятия правильного решения по управлению сети; уменьшить затраты времени на сбор и анализ служебной информации о состоянии сети и значительно сократить объемы этой информации.

Предложен новый интеллектуальный метод маршрутизации для СРС, который в отличие от существующих методов зондовой маршрутизации предусматривает введение дополнительных функций маршрутизации и интеллектуализацию процесса принятия решений по выбору маршрутов передачи данных на основе использования аппарата нечеткой логики.

Шестая глава посвящена характеристикам сверхширокополосных импульсных сигналов и их применению в системах радиосвязи, в частности в радиосетях Ad Hoc и MANET. Эти сигналы представляют собой дискретные потоки сверхкоротких импульсов, спектр частот которых может простирается от единиц герц до десятков гигагерц. В отличие от традиционных радиоустройств с сигналами на основе синусоидальных несущих они могут генерироваться и приниматься цифровыми устройствами с малой потребляемой мощностью и небольшими габаритами.

В *седьмой главе* рассмотрены специальные методы и средства управления доступом к радиоканалу и методам маршрутизации в самоорганизующихся сетях на основе импульсных сверхширокополосных сигналов. Уникальные свойства таких сигналов практически исключают возможность прямого использования известных протоколов управления доступом к радиоканалу, что требует разработки принципиально новых подходов в их проектировании. В главе дана классификация протоколов управления доступом для сетей с импульсными сверхширокополосными сигналами, приведены примеры их реализации и сравнительные показатели их эффективности. Рассмотрена координатная маршрутизация, использующая способность импульсных сверхширокополосных сигналов определять координаты абонентов в сети с высокой точностью и позволяющая существенно уменьшить объем служебного трафика при значительной динамике топологии сети, что в итоге увеличивает пропускную способность сети и снижает задержку передачи пакетов.

В монографии обобщен опыт работы авторов в течение последних лет по решению научно-технических проблем построения СРС.

Введение

Главной тенденцией развития будущих систем связи является мобильность. Мобильную связь, с точки зрения пользователя, можно представить в виде нескольких сферических уровней. Такая концепция была предложена в 2001 г. в проекте IST WSI и далее развита в "Книге новых концепций" Всемирного форума по исследованию беспроводных технологий – WWRF [1].

На первом уровне пользователь через системы беспроводной передачи на короткие расстояния объединяет в персональную сеть (PAN) все устройства, которые он носит с собой (мобильный телефон, фотоаппарат, часы и т. д), на втором уровне он соединяется с устройствами в его ближайшем окружении (с телевизором, персональным компьютером, холодильником и др.) – локальная радиосеть (WLAN). Третий уровень обеспечивает непосредственную связь с ближайшими партнерами – другими ближними пользователями, своими транспортными средствами, системой охраны и т.п. Пользователи могут взаимодействовать между собой и/или обмениваться данными с объектами этого уровня.

На четвертом уровне для организации глобального покрытия используются различные системы мобильной связи и беспроводного доступа, сети кабельной фиксированной связи, спутниковые системы, системы на высотных платформах. Главная услуга этих сетей – осуществление доступа к современным глобальным сетям, в частности к сети Интернет, и предоставление соответствующего уровня поддержки для различных терминалов.

Одним из вариантов реализации систем четвертого уровня может быть интегрированная сеть мобильной, беспроводной и фиксированной связи [1]. При дальнейшем развитии взаимосвязей (пятый уровень) сообщения, передаваемые по радиоинтерфейсам, будут отнесены к приложениям. Все указанные уровни на шестом уровне будут окружены "КиберПространством", где пользователь сможет быть в контакте со всеми своими корреспондентами, базами знаний, средствами телеметрии и управления и т.д., т.е. со своим кругом общения, услугами и транзакциями (рис. 1).

Такая концепция построения телекоммуникационных сетей, когда в центре находится пользователь, является движущей силой для создания множества услуг и приложений, организуемых через различные системы доступа и дальнейшего развития телекоммуникаций. "Пользователецентричный" подход даст людям возможность общения с кем угодно "в любом месте, в любое время". Новые системы будут удовлетворять потребности пользователей в различных приложениях. Однако дальнейшее развитие будет зависеть от ряда факторов и взаимосвязи между ними, а именно от спроса на услуги, интересов пользователей, моделей тарификации и оплаты за услуги, доступности частотного спектра для новых систем, уровня радиопо-

крытия, от экономических условий на различных рынках. В свою очередь все эти факторы складываются в сложную цепочку технических, экономических, социальных, политических и правовых условий, которые должны быть гармонизированы в рамках мирового сообщества, прежде всего в рамках действующих организаций, таких как, Международный союз электросвязи (ITU) и партнерские проекты 3GPP и 3GPP2 [1].

В рассматриваемой концепции огромная роль принадлежит самоорганизующимся радиосетям. Самоорганизующиеся радиосети предполагают возможность организации беспроводной сети без участия человека или с его минимальным участием. Данная архитектура сети получила название Ad Hoc, что в данном случае означает "случайная, спонтанная" или "специально созданная для определенных целей" [1–3]. Основой для создания таких сетей является высокий уровень "интеллектуальности" современных радиотерминалов, содержащих кроме приемопередающих блоков достаточно производительные вычислительные средства – процессор, память большой емкости, что позволяет реализовывать сложные алгоритмы.

Сети Ad Hoc состоят из беспроводных узлов. Под узлом сети понимается беспроводной коммуникатор (переносный компьютер, персональный секретарь, транспортное средство, сенсорное устройство, робот и т.п.), оснащенный радиомодемом. Узлы связаны друг с другом в пределах взаимной радиовидимости, определяемой параметрами радиопередающих устройств, рельефом местности и условиями распространения радиоволн. Отличительной особенностью каждого узла является его способность выполнять функции как *хоста*, т.е. источника и приемника информации, так и *маршрутизатора* информационных и служебных пакетов других абонентов радиосети.

Узлы сети могут быть как стационарными, так и мобильными, однородными или разнородными (отличающиеся мощностью передатчика, емкостью своих батарей питания, производительностью процессоров и т.д.), а также могут размещаться на местности или в пространстве и случайным, и детерминированным способом. При этом процесс передачи информации в данных сетях осуществляется без какого-либо центра управления. Это означает, что каждый узел должен самостоятельно выполнять определенный набор функций управления передачей информации по сети. *Отсутствие постоянной инфраструктуры и децентрализованность управления* – характерные черты самоорганизующихся радиосетей.

Сферами применения сетей Ad Hoc и MANET являются, в первую очередь, сети связи военного назначения тактического уровня, а также сети, развертываемые в условиях чрезвычайных ситуаций и природных катаклизмов.

Гражданскими сферами применения являются: домашние сети и сети предприятий, сенсорные (телеметрические) сети различного назначения, сети контроля и диспетчеризации транспортных средств, сети, создаваемые в удаленных районах, где отсутствует стационарная инфраструктура (сельская местность, пустыни, Арктика и Антарктика, тундра, тайга и т.п.).

Характерными особенностями данных сетей (в отличие от сетей со стационарной инфраструктурой) являются следующие признаки:

1. *Изменяемое количество узлов и площадь покрытия сетью.* Количество узлов сети может варьироваться от десятков до десятков или сотен тысяч узлов. В зависимости от количества узлов, мощности их передатчиков и используемых частот географическое пространство покрытия сетью может меняться в широких пределах.

2. *Мобильность и стационарность узлов.* Стационарные Ad Hoc сети сохраняют неизменность местоположения узлов, но предполагают их произвольное включение в сеть и выключение из сети. Мобильные самоорганизующиеся радиосети MANET (Mobile Ad Hoc Networks) предусматривают возможность перемещения любого узла сети.

3. *Случайность топологии сети, ее неоднородность и динамичность изменения.* Поскольку абоненты сетей могут быть мобильными, то топология сети может постоянно меняться. Кроме того, каждый узел может иметь различные связные и вычислительные ресурсы – иметь разную мощность передатчика, иметь возможность изменять уровень мощности передатчика или диаграмму направленности антенны, быть оснащенный аккумуляторными батареями различной емкости.

4. *Принцип организации передачи информации – коммутация пакетов с использованием многоскачковой маршрутизации.* Этот принцип заключается в том, что каждый узел сети, будучи передатчиком и приемником “собственной” информации, выступает в качестве ретранслятора и маршрутизатора пакетов других абонентов сети. Под маршрутизацией понимается направление пакетов на определенные адреса или ретрансляция сигналов в определенных направлениях.

5. *Децентрализованный тип управления.* Такое управление предполагает автономность узлов в принятии решений по организации передач по определенным маршрутам. Иными словами, в сети отсутствует какая-либо фиксированная инфраструктура для передачи служебной информации или иного вида централизованного управления (в отличие от обычных телекоммуникационных сетей с системами управления [4, 5]). Каждый узел определяет маршрут передачи – последовательность узлов-ретрансляторов на основе предварительного или оперативного сбора информации о состоянии сети и связности ее абонентов в соответствии с *протоколами маршрутизации*, специально разработанными для самоорганизующихся сетей.

6. *Динамичность изменения связности при движении узлов и/или включении/выключении узлов в сеть.* Это требует контроля за прохождением пакетов по сети, изменения маршрутов пакетов при нарушенной связности, а также восстановления передачи сообщений с момента потери связности. Такой характер работы сетей приводит к изменению качества обслуживания сетью (задержка и потеря пакетов, полная потеря связности). Поэтому в самоорганизующихся сетях должны быть предусмотрены механизмы поддержания качества обслуживания за счет, например, передачи пакетов по многим маршрутам, коллективной ретрансляции пакетов.

7. *Многоканальность сетей.* Каждый узел может быть оборудован одним или несколькими приемопередающими устройствами, работающими в различных час-

тотных полосах. Таким образом, кроме коммутации пакетов в одном частотном канале возможна коммутация каналов.

8. *Масштабируемость.* При масштабируемости сеть легко наращивается и изменяет количество своих узлов. Увеличение размерности сети до сотен и тысяч узлов может потребовать введения локализации управления, т.е. разделение всей сети на кластеры с собственными протоколами маршрутизации и межкластерной ретрансляцией через узлы-шлюзы. Возможно и введение иерархии в сети, когда на основе узлов, имеющих достаточные ресурсы или хорошее месторасположение (например, на вершинах холмов), осуществляется прямая связь между конечными абонентами или кластерами через минимальное количество ретрансляций.

9. *Ограниченность ресурсов узлов сети.* Узел сети имеет ограниченные ресурсы (емкость памяти, производительность процессора, мощность передатчика и энергоемкость батарей). Энергия батарей расходуется как на коммуникационную (прием, передача, обработка сообщений и др.), так и на вычислительную (процессор) составляющие. Экономия энергии батарей питания – одна из задач разработчиков терминалов и протоколов взаимодействия.

10. *Ограниченная безопасность.* Широковещательная природа радиоканала позволяет злоумышленнику (противнику) осуществлять прослушивание передач узлов, анализировать сетевой трафик и нарушать или ухудшать работу сети, ставить активные и пассивные помехи. Поэтому в сети должны быть предприняты меры, минимизирующие или исключаящие возможное предумышленное отрицательное влияние на работу сетей. Такой мерой может быть применение на физическом уровне сложных радиосигналов, например сверхширокополосных.

Свою историю самоорганизующиеся радиосети берут с научных разработок начала 70-х годов прошлого столетия с момента внедрения принципа коммутации пакетов в телекоммуникационные технологии. Так, в 70-х годах проект ALOHA Гавайского университета был первой демонстрацией возможной пакетной широковещательной передачи в стационарной радиосети с одним ретранслятором [7]. В Киеве в конце 70-х годов авторами настоящей книги С.Г. Буниным и А.П. Войтемом была разработана и создана первая в Европе пакетная радиосеть "Дискрет". Эта сеть была построена на базе стационарных ретрансляторов, вокруг которых располагались абонентские терминалы, взаимодействующие между собой через эти ретрансляторы. Она была предназначена для пакетного обмена данными между вычислительными центрами научных учреждений города. Подобные сети были внедрены в ряде городов СССР. В работе [8] подробно изложена архитектура пакетной радиосети "Дискрет", приведены примеры реализации и представлены аналитические зависимости расчета основных параметров сети. В книге [9] рассмотрены принципы построения радиосетей и передачи информации с коммутацией пакетов, которые развиваются стремительными темпами в связи с практической реализацией сотовых систем телекоммуникаций, мобильного доступа к сети Интернет и ведомственным сетям.

В 1972 г. Министерство обороны США (DARPA, U.S. Defense Research Agency) спонсировало проект создания пакетной радиосети PRNET (Packet Radio Network) [10–12], предназначенной для обеспечения пакетной передачи данных на поле боя в тактическом звене управления. Данная экспериментальная узкополосная радиосеть небольшой размерности (до 50 мобильных узлов) использовала протокол множественного доступа с контролем несущей, применяла многоскачковую маршрутизацию с использованием алгоритмов маршрутизации, применяемых в стационарных сетях связи, и обеспечивала передачу данных со скоростями до 16 Кб/с.

Необходимо отметить, что в эти годы аналогичные научные разработки по созданию пакетных радиосетей проводились и в СССР при создании транспортной среды (радиосетей с коммутацией сообщений) для полевого комплекса средств автоматизированного управления войсками тактического звена управления “Маневр”.

В 80-х годах прошлого века в США появились первые образцы тактических пакетных радиосетей DARPA PRNET и CNR (Combat Net Radio) [10–12], а в СССР – тактические системы радиосвязи с использованием аппаратуры передачи данных “Базальт” и позднее “Редут”. Данные пакетные радиосети поля боя (десятки транспортных единиц) использовали простейшие методы множественного доступа (случайный и с контролем несущей), таблично-ориентированный метод маршрутизации на основе алгоритма Беллмана–Форда (сеть PRNET) или фиксированную маршрутизацию (аппаратуру передачи данных “Базальт”, “Редут”). Аппаратура узлов сети была довольно громоздкой, отличалась низкой надежностью и значительной энергозатратностью. В данных сетях каждый узел представлял собой ретранслятор с функциями маршрутизатора (были использованы протоколы маршрутизации, принятые в стационарных сетях связи). Скорость передачи в данных сетях достигала десятков килобит в секунду.

Последующим проектом в 1983–1990 гг. был SURAN (Survivable Adaptive Radio Network) [12], предусматривающий автоматическое установление и поддержание маршрутов передачи для сетей большой размерности (до 10000 узлов) и определенного уровня мобильности узлов. Радиосредства стали компактнее и дешевле, с меньшим энергопотреблением. Планировалось использовать иерархический таблично-ориентированный метод маршрутизации.

Дальнейший технологический прогресс в области вычислительной техники и появление переносных ЭВМ потребовали их соединения с ведомственными сетями и сетью Интернет. В интересах разработки протоколов для сетей Ad Hoc была сформирована рабочая группа MANET (Mobile Ad Hoc Networking) под эгидой IETF (Internet Engineering Task Force) [2].

С 1994 г. DARPA инициировало программу создания глобальной мобильной информационной системы GloMo (Global Mobile Information Systems) [13]. Целью GloMo являлось (при использовании технологии беспроводных шлюзов WINGs (Wireless Internet Gateways)), обеспечить связность мобильных пользователей через сеть Интернет. Для военных было создано новое поколение цифровых радиосредств тактического уровня NTDR (Near-Term Digital Radio). NTDR имеет открытую архи-

тектуру, построено на основе коммерческих модулей и стандартных шин, использует Интернет-протоколы и обеспечивает взаимодействие с другими сетями. Кроме того, NTDR обеспечивает автоматическое конфигурирование сети, обмен информацией между компьютерами в полосе частот 225–450 МГц со скоростью передачи 288 Кбит/с, мощность передатчиков изменяется от 2 мВт до 20 Вт, дальность связи до 12,5 км. В бригаде используется до 400 радиосредств NTDR.

С появлением технологии Интернет стало возможным создание живучих сетей радиосвязи тактического звена управления – тактический Интернет ТИ (Tactical Internet), предполагающий незначительную модификацию коммерческих протоколов [14]. Так, для ТИ применялся известный в стационарных сетях протокол маршрутизации OSPF (Open Shortest Path First). Используя периодические HELLO-сообщения, каждый узел мог строить и находить маршруты передачи. Время организации такой сети было значительным, но в целом удовлетворяло требованиям того времени. Однако используемые в ТИ протоколы в полной мере не могли обеспечить обслуживание возросшего числа пользователей и объемов передаваемой информации и выполнить требования мобильности пользователей, оснащенных компьютером (в настоящее время в дивизии США около 1300 компьютеров, в полностью “компьютеризированной” дивизии – больше 5000 компьютеров).

Поэтому были определены основные технические требования к следующим поколениям тактической связи [15]. Это:

- 1) интеграция всех видов трафика (речь, IP данные, графика, видео, видеоконференции);
- 2) надежное функционирование на значительных географических площадях в условиях применения как обычного, так и ядерного, биологического и химического оружия;
- 3) полная мобильность всех пользователей и всех элементов сети;
- 4) засекреченность передачи всех видов информации;
- 5) минимальное участие человека в вопросах планирования и ведения связи.

Далее вместо разнородных и разнотипных средств радиосвязи (имеющихся на вооружении) предполагается создать унифицированное программируемое средство радиосвязи FDR / MBMMR / JTRS (Future Digital Radio / Multi-Band Multi-Mode Radio / Join Tactical Radio system), к которому предъявляются следующие основные требования [15]: открытая архитектура, программируемость, модульность построения, динамическое управление частотным ресурсом, поддержка коммерческого TCP/IP-протокола, обеспечение самоорганизации сети, передача засекреченной информации с использованием ретрансляции передаваемых пакетов, интеграция передачи речи и данных, дальность радиосвязи от 4 до 10 км.

В настоящее время идут исследования по созданию интеллектуальных радиосредств и сетей в целом, позволяющих адаптировать свои режимы и алгоритмы работы на основе решений, использующих базы данных и знаний.

Растущий коммерческий интерес к беспроводным сетям в 90-х годах прошлого века привел к появлению ряда стандартов и технологий физического и канального

уровней для переносных компьютеров: IEEE 802.11 различных версий, Bluetooth, HiperLan [16] и др. Однако эти стандарты и протоколы не учитывают особенностей построения и функционирования самоорганизующихся радиосетей.

Развитие элементной базы и возросшие вычислительные возможности на сегодняшний день определили многообразие самоорганизующихся радиосетей (рис. 1):

- сети Ad Hoc – сети со случайными, но стационарными абонентами;
- мобильные радиосети (сети MANET) – сети мобильных абонентов, реализующие полностью децентрализованное управление (отсутствие базовых станций);
- ячеистые сети (MESH) – сети ячеистой структуры, состоящие из беспроводных стационарных маршрутизаторов (создают беспроводную магистраль и зону обслуживания абонентов) и мобильных/стационарных абонентов, имеющих доступ (в пределах зоны радиосвязности) к одному из маршрутизаторов;
- сенсорные (телеметрические) сети, состоящие из малогабаритных сенсорных узлов с интегрированными функциями мониторинга определенных параметров окружающей среды, обработки и передачи данных по радиоканалам;
- автомобильные сети (сети VANET) – сети связи транспортных средств.



Рис. 1. Классификация самоорганизующихся сетей

Однако, несмотря на длительное время разработки самоорганизующихся сетей, и сегодня остаются нерешенными значительное количество проблем, препятствующих широкому распространению таких сетей в общей глобальной структуре телекоммуникаций. Среди них можно выделить такие проблемы.

1. Организация надежного транспорта данных при изменяемой структуре и топологии сети.

2. Повышение скорости передачи информации, которая обычно ограничена выделенным частотным ресурсом и методами доступа абонентов к коллективно используемому ресурсу.

3. Создание эффективных методов (алгоритмов) управления на различных уровнях "Эталонной модели" открытых систем Всемирной организации по стандартизации (ИСО) применительно к конкретной самоорганизующейся радиосети. Появление новых технологий радиосвязи (MIMO, систем определения местоположения, широкополосные и сверхширокополосные сигналы и др.), а также различные прикладные применения требуют создания новых методов управления данными сетями, в том числе использования методов искусственного интеллекта.

4. Проблема эффективного использования ресурсов узлов (большинство узлов сети могут быть портативными и соответственно ограничены в своих ресурсах: по производительности процессора, емкости памяти и энергоемкости батарей и др.).

5. Обеспечение заданного качества обслуживания для различных типов трафика, связанного со скоростью передачи, с задержкой и потерей пакетов, временем восстановления связности после ее потери.

6. Проблема масштабируемости и адресации в сетях при организации самоорганизующихся радиосетей большой размерности.

7. Взаимодействие с сетями общего пользования и сетью Интернет.

8. Обеспечение безопасности в условиях децентрализованного управления и широкоэвещательной природы радиоканала.

В настоящей монографии уделено внимание решению некоторых из указанных проблем, представляющихся, по мнению авторов, наиболее важными. Так, рассматривается способ увеличения пропускной способности сети за счет применения импульсных сверхширокополосных сигналов I-UWB (Impulse Ultra Wide Band). На основе этих сигналов можно создавать большие ансамбли взаимоортогональных сигналов, что в принципе позволяет осуществлять одновременную передачу многими абонентскими терминалами, находящимися в зонах взаимной радиовидимости. При этом протоколы множественного доступа к среде передачи (каналу связи) могут быть более эффективными, чем в сетях с традиционными узкополосными или широкополосными сигналами с небольшой базой сигнала. Кроме того, такие сигналы обладают целым рядом положительных свойств, позволяющих рассматривать их как альтернативу используемым в настоящее время так называемым "сигналам с полки". Импульсные сверхширокополосные сигналы решают проблему "закрытия информации" и самого факта передачи на сигнальном уровне.

Следует отметить и конструктивные особенности радиоаппаратуры для их генерации и приема – подавляющая часть узлов выполняется как цифровые на основе технологии CMOS, имеет высокую надежность и малое энергопотребление.

Список литературы

1. Грамаков Ю.А. Концепции развития мобильной и беспроводной связи общего пользования // Электросвязь. – 2008. – № 12. – С. 51–57.
2. Internet Engineering Task Force (IETF). Mobile Ad Hoc Networks (MANET) Working Group Charter. [Электронный ресурс] – Режим доступа до журн.: <http://www.ietf.org/html/charters/manet-charter.html>
3. Perkins C.E. Ad Hoc Networking / Perkins C.E. – Addison-Wesley Professional, 2001. – 452 p.
4. Романюк В.А. Мобильные радиосети – перспективы беспроводных технологий // Сети и телекоммуникации. – 2003. – № 12. – С. 62–68.
5. Дымарский Я.С., Крутякова Н.П., Яновский Г.Г. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи. – М.: НТЦ "Мобильные коммуникации", 2003. – 384 с.
6. Гребешков А.Ю. Стандарты и технологии управления сетями связи. – М.: Эко-Трендз, 2003. – 288 с.
7. Kahn R. Advances in Packet Radio Technology // Proc. of the IEEE. – 1978. – 66. – P. 1468–1496.
8. Бушин С.Г., Вольтер А.П. Вычислительные сети с пакетной радиосвязью. – К.: Техника, 1989. – 223 с.

9. Ильченко М.Е., Бунин С.Г., Войтер А.П. Сотовые радиосети с коммутацией пакетов. – К.: Наук. думка, 2003. – 266 с.
10. Эфремидес Э., Уилеатир Д.Э., Бейкер Д.Д. Вопросы проектирования надежных мобильных радиосетей, использующих методы передачи и приема сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты // ТИИЭР. – 1987. – 75, № 1. – С. 68–90.
11. Fifer W., Bruno F. The Low-Cost Packet Radio // Proc. of the IEEE – 1987. – 75. – P. 33–42.
12. Beyer D.A. Accomplishments of the DARPA SURAN Program // Military Communications Conference, – 1990. – Vol. 2. – P. 855–862.
13. Leiner B., Ruth R., Sastry A. Goals and Challenges of the DARPA GloMo Program // IEEE Personal Communications. – 1996. – 5. – P. 34–43.
14. Романюк В.А. Направления развития тактических сетей связи // Зв'язок. – 2001. – № 3. – С. 63–65.
15. Sharret I.P. WIN-T—The Army's New Tactical Intranet / Sharret I.P. // IEEE MILCOM'99. – 1999. – P. 45.04.01–45.04.05.
16. Шиллер Й. Мобильные коммуникации / Пер. с англ. – М.: Изд. дом "Вильямс", 2002. – 384 с.

ГЛАВА 1

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА, ПАРАМЕТРЫ И ПРИМЕРЫ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ РАДИОСЕТЕЙ

1.1. Классификация, параметры самоорганизующихся радиосетей

К основным параметрам самоорганизующихся радиосетей (СРС) можно отнести:

- *количество и мобильность узлов сети, размеры сети* (географической территории) и *плотность размещения узлов*;
- *связность* — обеспечивается возможностью обмена информацией между узлами непосредственно друг с другом (связь прямой видимости) или используется ретрансляция передаваемых сообщений; различная мощность передачи узлов приводит к появлению как симметричных, так и асимметричных каналов;
- *сетевую топологию* — определяется положением узлов и связями между ними; может характеризоваться динамикой ее изменения, вызванной как мобильностью самих узлов, так и внешней помеховой обстановкой;
- *тип трафика* — зависит от предназначения сетей (речь, передача данных, видео, телеметрия и др.);
- *внешнюю среду* — определяет условия функционирования сети (город, лес, горы, поле боя и т.д.).

На рис. 1.1 представлена классификация самоорганизующихся радиосетей по [1–8]:

- 1) способу построения системы управления сетью — одноуровневые (flat) и иерархические;
- 2) мобильности узлов сети — стационарные, мобильные и гибридные;
- 3) способу разделения радиоресурса — с детерминированным, случайным или гибридным способом разделения радиоресурса;
- 4) способу синхронизации — синхронные и асинхронные;
- 5) ширине полосы пропускания радиоканала — узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные (UWB);
- 6) составу оборудования узлов: одноканальные и многоканальные (один узел содержит несколько приемопередатчиков); однородные и неоднородные (радиотерминалы с различной мощностью и производительностью процессора, объемом памяти, емкостью батареи и др.); имеющие или не имеющие систему позиционирования (например, GPS); имеющие всенаправленные антенны или антенны с направленной диаграммой направленности (например, MIMO);

Окончание табл. 1.3

Преимущества (+) и недостатки (-) самоорганизующихся радиосетей	Средства достижения преимущества
Незначительное расстояние непосредственной связи (-)	Использование связи в условиях прямой видимости – зависимость дальности связи от частоты, мощности, типа антенны и т.п. Использование маршрутизации в сети
Передача разных видов трафика (+)	Применение эффективных протоколов физического, канального, сетевого и транспортного уровней (протоколов поддержки заданного качества обслуживания – QoS). Координация взаимодействия протоколов OSI. Интеллектуализация процессов принятия решений по управлению сетью
Маршрутизация (+)	Применение эффективных методов маршрутизации
Высокая безопасность (+)	Применение гибридных систем защиты (симметричных и асимметричных), создание распределенных трастовых центров, систем выявления вторжений и т.п.
Высокая помехозащищенность (+)	Использование широкополосных сигналов (метод частотных прыжков – FHSS, метод прямой последовательности – DSSS), в перспективе – применение гибридных схем распределения ресурсов (FDMA/TDMA/CDMA), применение сверхширокополосных сигналов

Можно выделить требования к перспективным радиосредствам военного назначения:

- высокая пропускная способность радиоканала (> 200 Кб/с);
- многодиапазонность и многофункциональность (FDMA/TDMA/CDMA), в перспективе – использование импульсных сверхширокополосных сигналов;
- способность программирования всех видов и режимов работы;
- автоматизация процессов ведения связи (режим “включил и работай” – Plug-and-Play) и возможность самоорганизации сети;
- интеллектуальность, децентрализованность и оптимизация функций управления сетевыми ресурсами (маршрутизация, нагрузка, топология, радиоресурс, безопасность и т.д.) [1];
- работа с разными видами трафика (голос, данные, видео);
- наличие системы позиционирования, направленных антенн, работа в движении;
- модульность выполнения, открытая архитектура, низкое энергопотребление.

В то же время существуют весомые трудности создания самоорганизующихся радиосетей – необходимость решения значительного количества научных проблем (маршрутизация, распределение радиоресурсов, управление мощностью, управление

топологией, децентрализованное управление, безопасность, обеспечение заданного качества передачи информации и т.п.) при ограничениях на ресурсы радиотерминалов (по объему памяти, производительности процессора, энергоемкости батареи и т.д.).

2-й уровень мобильной компоненты (рис. 1.4) образует сеть мобильных базовых станций (наземная магистральная сеть). Она предназначена для улучшения качества связи, прежде всего, повышение производительности мобильной компоненты и предоставление заданного качества обслуживания абонентов (QoS).



Рис. 1.4. Сеть мобильных базовых станций (самоорганизующаяся радиосеть 2-го уровня)

Каждая мобильная базовая станция представляет собой узел (шлюз) коммутации, который с помощью имеющихся средств радиопередачи:

1) создает сеть МБС по принципам самоорганизующейся радиосети (а не по принципам сотовой или транкинговой сети!) с использованием направленных антенн. Для функционирования сети МБС в режиме самоорганизации необходимо решать задачи динамического формирования (переформирование) топологии сети, маршрутизации, распределения радиоресурсов (наиболее целесообразно использовать детерминированные методы распределения радиоресурсов) и т.п. [2–6]. Также для увеличения производительности и разведзащищенности сети МБС возможно использование средств оптического диапазона – лазерных систем передачи;

2) обеспечивает доступ мобильных абонентов к использованию ресурсов сетей мобильных базовых станций и беспилотных летальных аппаратов (БЛА);

Дополнительной составляющей мобильной компоненты могут служить сенсорные сети (**0-уровень**), которые обеспечивают прием и передачу разведывательной информации о противнике и выдаче ее органам управления войсками и оружием. Сенсорные устройства представляют собой интегрированную платформу, которая объединяет возможности сенсоров (внешних датчиков, регистрирующих совокуп-

ность физических параметров – акустических, вибрационных, радиационных, химических, биологических и т.п.) с микрокомпьютерами, соединенных в беспроводную сеть. Принцип построения – децентрализованное управление (для сенсорных сетей значительной размерности – иерархическое) [12].

На рис. 1.5 приведен пример функционирования наземных стационарных сенсорных сетей: выявление сенсорами движения танка неприятеля, передача координатной информации местоположения танка (по сенсорной и другим сетям) средствами поражения (например, боевому вертолету) и уничтожение танка.

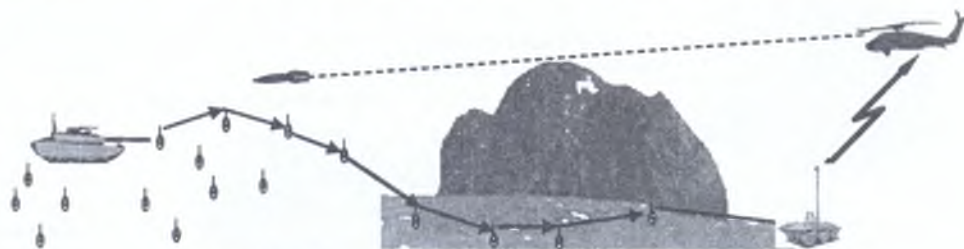


Рис. 1.5. Применение наземной стационарной сенсорной сети

Для связи между географически разделенными группировками войск (зонами сети) или повышение надежности связи между МБС и производительности мобильной компоненты создается **третий (верхний) уровень** – воздушная магистральная сеть, которая может быть реализована на беспилотных летательных аппаратах (самолет, дирижабль) (рис. 1.6), а также спутниках. Предложения относительно создания сети БЛА в интересах всей Украины могут быть найдены в [13].

Каждый БЛА оснащен двумя типами радиосредств с использованием направленных антенн: первый – для связи с МБС или выделенными абонентами первого (нулевого) уровней; второй – для обмена информацией с соседними БЛА. Беспилотные летательные аппараты объединены в сеть воздушных узлов коммутации сообщений (пакетов) с реализацией функций маршрутизации: сбор (рассылка) маршрутной информации, ее хранение, вычисление маршрутов, передача пакетов по маршрутам двух типов. Первый тип маршрута обуславливает ретрансляцию трафика в пределах своей зоны обслуживания, второй – между разными ($m-n$) зонами: абонент_г–МБС_г–БЛА_г–...–БЛА_н–МБС_н–абонент_н.

Преимущества применения сети на БЛА состоят в следующем (рис. 1.6):

- 1) обеспечивается связность между географически разделенными группировками войск (зонами мобильной компоненты);
- 2) повышается надежность связи между МБС в пределах одной зоны за счет появления альтернативных независимых маршрутов передачи;
- 3) повышается производительность сети за счет использования радиоканалов между БЛА с большей пропускной способностью в сравнении с радиоканалом типа МБС–МБС, эффективности управления мобильным компонентом (уменьшается

объем переданной служебной информации и снижается время ее сбора), сокращения в несколько раз количества ретрансляций в маршрутах передачи информации и т.д.;

4) обеспечивается заданное качество обслуживания абонентов (QoS) за счет применения детерминированных протоколов множественного доступа [14];

5) обеспечивается дистанционный сбор разведывательной информации или ее снятие с датчиков сенсорных сетей.



Рис. 1.6. Сеть на БЛА

Таким образом, система связи тактического звена развивается в направлении применения открытой архитектуры, внедрения новейших телекоммуникационных технологий, которые используются в коммерческих системах связи. Существующие гражданские технологии (физического и канального уровней) беспроводных сетей связи представляют собой основу для создания мобильных радиосетей тактического уровня.

Новая архитектура мобильной компоненты систем военной связи – трехуровневая иерархия неоднородных самоорганизующихся радиосетей (мобильные абоненты – мобильные базовые станции – беспилотные летательные аппараты) типа MANET. Реализация каждого ее уровня позволит значительно улучшить качество функционирования системы связи и параметры информационного обмена. Однако для ее реализации необходимо решение ряда проблем научного (разработка математического и программного обеспечения интеллектуальной децентрализованной системы управления и т.п.) и технологического плана (построение программируемых многофункциональных многодиапазонных радиосредств).

Применение предложенной архитектуры мобильной компоненты приведет к появлению принципиально новых форм (способов) ведения боевых действий, изменит формы и способы управления войсками, а также позволит значительно увеличить боевую эффективность войск.

1.2.2. Меш-сети

Беспроводный доступ последнее время получает все большую популярность как в сотовых сетях связи, так и в беспроводных локальных сетях WLANs (Wireless Local Area Networks), которые обычно ассоциируются с семейством стандарта IEEE 802.11 (называемого популярно Wi-Fi). Одна из самых заметных тенденций последних лет в Европе – чрезвычайно быстрый рост беспроводных сетей, подкрепляемый потребительским спросом на ноутбуки со встроенной поддержкой Wi-Fi.

Данные технологии (совершенно различные по принципам построения) предназначены для обеспечения связности между абонентами и могут найти применение значительному количеству приложений. Однако превращение Wi-Fi в действующий инструмент корпоративной коммуникации и подлинно массовую технологию обмена данными ставит перед разработчиками серьезную проблему “бесшовного” межсетевого роуминга. Эта проблема решается в рамках ячеистой (mesh) архитектуры и именно с ее внедрением аналитики связывают очередной виток роста беспроводных сетей [15, 16].

Сотовые сети при большом покрытии обеспечивают относительно невысокую скорость передачи информации. Даже третье поколение сетей 3G имеет невысокую скорость передачи данных (не более 2 Мб/с) по сравнению со скоростями в беспроводных локальных сетях (более 50 Мб/с для протоколов IEEE 802.11a, IEEE 802.11g и других подобных решений). С другой стороны, сети WLANs в большинстве своем имеют меньшее покрытие и, соответственно, ограничивают мобильность абонентов. Кроме того, для увеличения покрытия WLANs необходимо построение соответствующей проводной магистрали.

Беспроводные городские сети WMANs (Wireless Metropolitan Area Networks), основанные на семействе стандартов IEEE 802.16, частично устраняют данные недостатки и обеспечивают высокую скорость передачи с гарантированным качеством обслуживания значительному количеству пользовательских баз (до десятков миль между базовыми станциями). Основным недостатком WMANs – это отсутствие (на сегодня) поддержки мобильности и необходимость прямой видимости (если пользователь не имеет связности прямой видимости с базовой станцией WMANs, то и маловероятно получение данного сервиса). Обычно из-за высокой плотности преград (строящиеся многоэтажки или деревья) более половины пользователей потенциально не могут обеспечить радиосвязь прямой видимости. Кроме того, оборудование базовых станций довольно сложно и дорого.

Беспроводные ячеистые сети (БЯС) или WMN (Wireless Mesh Networks) потенциально исключают многие из перечисленных недостатков и при этом обеспечивают дешевый беспроводный доступ к Интернет (проводной сети) для фиксированных и/или мобильных абонентов (действующий протокол беспроводных ячеистых сетей – IEEE 802.11s). На рис. 1.7 представлен типовой вариант построения БЯС, которая состоит из беспроводных маршрутизаторов (mesh-маршрутизаторов), шлюзов и абонентов. Для подключения к Интернет достаточно одного шлюза.



Рис. 1.7. Вариант беспроводной ячеистой сети

Каждый абонент оснащен радиооборудованием для связи с mesh-маршрутизаторами, которые образуют беспроводную магистраль ячеистой сети и обеспечивают динамическую маршрутизацию пакетов между собой. Mesh-маршрутизаторы фактически являются стационарными узлами (обычно монтируются на видимых участках крыш домов (рис. 1.8)).

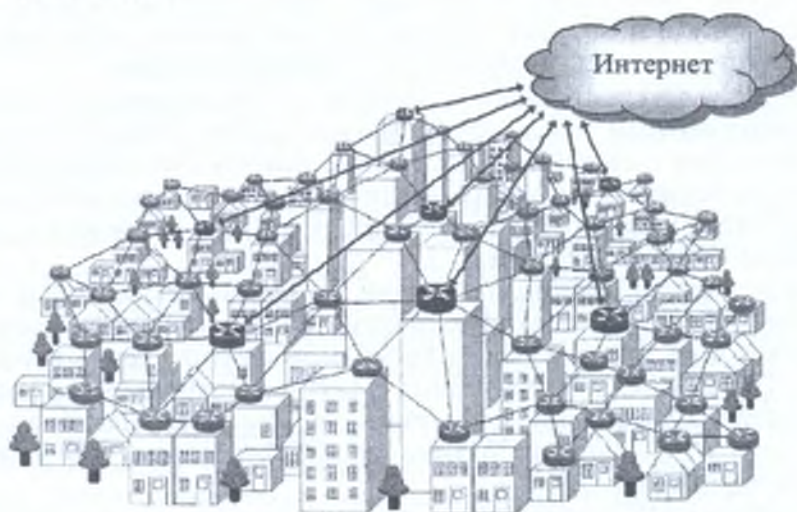


Рис. 1.8. Пример МЯС

Оборудование mesh-маршрутизаторов отличается от оборудования абонентов следующими основными характеристиками: большая мощность передачи, наличие нескольких приемопередающих устройств и антенн, поддержка нескольких беспроводных протоколов, отсутствие ограничений на потребляемую мощность, реализа-

ция протоколов маршрутизации и др. В общем случае архитектура БЯС иерархична и представлена следующими элементами:

- верхний уровень – шлюзы (специфические маршрутизаторы), связанные с Интернетом высокоскоростными проводными каналами;
- средний уровень – магистральная сеть стационарных беспроводных маршрутизаторов;
- низший уровень – сеть, которую образуют стационарные или мобильные пользователи, связанные в ячейке с беспроводным маршрутизатором (в общем случае абоненты также могут выступать в роли маршрутизаторов, т.е. могут передать данные друг через друга – фактически образуя сеть типа MANET – Mobile ad-hoc Networks).

Алгоритм обмена информацией состоит в следующем. При необходимости передачи mesh-абонентом данных адресату (mesh-абоненту или шлюзу), не находящемуся с ним в непосредственной зоне радиосвязности, пакет передается ближайшему mesh-маршрутизатору. Далее пакет (согласно принятому протоколу маршрутизации) передается по маршруту беспроводной магистрали, пока не достигнет mesh-маршрутизатора, имеющего радиосвязность с адресатом, который и передаст пакет адресату.

Обычным способом организации беспроводных ячеистых сетей является использование в радиоканалах отдельных стандартов (для уменьшения помех) между маршрутизаторами магистрали и каналами маршрутизатор–абонент. Например, стандарт IEEE 802.11a может быть использован для каналов магистрали, а стандарт IEEE 802.11b – для связи между абонентом и маршрутизатором.

БЯС предоставляют возможность перейти от локализованных точек доступа к полностью беспроводным зонам, охватывающим здание (кампус) или даже город. Сетевые архитекторы и системные интеграторы получают беспрецедентную свободу и гибкость в инсталляции высокопроизводительной сети в рекордно короткое время. При этом отсутствие проводки существенно снижает стоимость и упрощает текущие операции по настройке сети.

Отсутствие дополнительных требований к БЯС (за исключением маршрутизации) объясняет гибкость и многовариантность их построения. Например, доступ к Интернет может быть проводным или беспроводным (типа точка-точка или точка-многоточка). Пользователи могут входить в сеть по внутренним беспроводным каналам, используемым для связности мобильных абонентов, или применять другие технологии (сети Wi-Fi, сотовые, WiMax, MANET, сенсорные) и работать с различными приложениями (рис. 1.9).

Особенностями БЯС (одни из них присущи ячеистым сетям, другие расширяют понятие гибридных MANETs [15–17]) являются следующие характеристики.

Беспроводность. БЯС, с одной стороны, ограничена в дальности передачи из-за затухания при распространении радиоволн, потенциально имеет высокую величину ошибок и потерь пакетов, а с другой, – обеспечивает мобильность абонентов.

Многоскачковость. Обычная беспроводная сеть увеличивает покрытие сети за счет повышения мощности передачи или добавления дополнительных точек досту-



Рис. 1.9. Вариант построения гибридной ячеистой сети

па. В противоположность этому узлы БЯС, используя многоскачковую маршрутизацию, передают данные без увеличения радиуса передачи.

Избыточность. Беспроводная магистраль формирует ячеистую сеть. Это обеспечивает дополнительные каналы (маршруты) между mesh-маршрутизаторами, mesh-шлюзами и mesh-абонентами. Отказ канала или узла не приводит к отказу в передаче сообщения.

Мобильность. В общем случае mesh-маршрутизаторы и mesh-шлюзы также могут быть мобильными. В этом случае БЯС фактически становится двухуровневой сетью MANET, проблемы управления которой описаны в [17]. В отличие от MANET ячеистые сети имеют определенную иерархическую архитектуру. Mesh-шлюзы и mesh-маршрутизаторы формируют квазистатичную магистраль, не ограничены в мощности передатчиков и производительности процессоров, могут оснащаться несколькими приемопередатчиками. Абонент, не реализующий функции маршрутизации, может быть внедрен в БЯС без всяких ограничений (в противоположность MANET, где все узлы должны выполнять функции маршрутизатора).

Благодаря своим особенностям ячеистые сети могут быть использованы в различных сферах.

Широкополосный доступ к Интернет. Пока еще значительное количество пользователей не имеет возможности подключиться по кабелю или DSL-каналам к Интернет. Решение этого вопроса – использование БЯС. Так, в Европе публичный доступ к Интернет пока предоставляют несколько городских БЯС, в США эта услуга значительно более развита. В Москве продолжается строительство ячеистой сети

стандарта Wi-Fi, насчитывающей более 6 тыс. базовых станций. В Тайбэе (Тайвань) развернута ячеистая сеть, включающая 10 тыс. точек беспроводного доступа на территории около 75 тыс. кв. км.

Сети поселков. Локальные сети стремительно шагнули за пределы крупных городов, где конкуренция очень велика. Многие Интернет-провайдеры занялись подключением коттеджных и дачных поселков, где беспроводное подключение является единственно рентабельным способом подключения клиентов. Аналогичная ситуация сложилась и в регионах с малоэтажной застройкой, когда тянуть кабель в каждый дом с несколькими квартирами просто не выгодно. На рис. 1.10 представлен один из вариантов сети поселка.



Рис. 1.10. Пример сети поселка

Сети помещений, предприятий. Для получения покрытия с использованием протокола 802.11 требуется значительное количество точек доступа, которые в свою очередь связаны Ethernet-сетью. Ячеистые сети позволяют обеспечить связность точек доступа без прокладки кабеля.

Гетерогенные сети ячеистой топологии, объединяющие большое число беспроводных датчиков и сравнительно немногочисленные точки доступа с кабельными каналами, могут стать практичным и экономически выгодным решением на предприятиях. Объединение датчиков в сеть позволит автоматизировать сбор данных и сократить затраты на ручной сбор данных. Создание кабельных сетей было бы непрактично и дорого. Арендные помещения служат хорошим примером целесообразности разворачивания БЯС.

Домашние сети. В данной среде существенным преимуществом использования ячеистой сети является ее способность поддерживать приложения, требующие большой пропускной способности (например, для передачи видео высокого разрешения). Использование БЯС в домашних условиях поможет связать настольный ПК, ноутбук и карманные компьютеры, телевизионные приемники высокого разрешения, проигрыватели DVD, игровые приставки, видеокамеры и другие бытовые электронные устройства без необходимости прокладки кабелей, установки сетевых розеток и специальной настройки устройств.

Городские сети. В городской среде с неоднородным покрытием или в корпоративной среде с различным типом оборудования БЯС решает также проблемы взаимодействия разных беспроводных сетей (а также проводных и беспроводных сетей). В большинстве случаев внедрение БЯС устраняет необходимость прокладки магистральной линии связи.

Обычно в городах и мегаполисах экстренные службы используют собственные, закрытые коммуникационные системы, работающие на разных радиочастотах. В результате стихийного бедствия данные радиосистемы не позволяют сотрудникам таких служб связываться друг с другом. В случае функционирования на территории города БЯС сотрудники всех экстренных служб смогут подключать к данной единой сети свои коммуникационные устройства.

Доступ мобильных абонентов. Третье поколение сетей 3G обеспечивает относительно высокую скорость передачи данных (до 3,6 Мб/с для стационарных пользователей и 144 Кб/с для высокомобильных пользователей). Внедрение БЯС позволит уже сейчас получить более высокие скорости передачи при отсутствии получения дополнительных лицензий и незначительных инвестициях.

Ячеистые сети коммунальных служб. В качестве узлов выступают узлы (счетчики) электроэнергии, газа и воды в одной сети. Счетчики образуют самоорганизующуюся и самовосстанавливающуюся беспроводную ячеистую сеть, которая управляется через шлюз. Узлы периодически передают в шлюз накопленные данные. Один шлюз может поддерживать до тысячи приборов учета. Хранение данных в каждом узле, автоматическая синхронизация времени и реорганизация сети в обход нарушенных каналов связи позволяют получить надежное, мощное, экономичное и отказоустойчивое решение для учета расхода ресурсов.

Ячеистые сети военного применения (обеспечения общественной безопасности). Такими сетями являются, например, ячеистые тактические сенсорные сети (крошечные сенсоры, оснащенные передатчиками с функциями маршрутизации). Каждый сенсор обеспечивает беспроводную передачу информации по сенсорной сети (например, координаты танка) командованию для ее анализа и принятия решения.

Ячеистые сети для передачи развлекательной информации. В течение следующих пяти лет действительно мобильные ячеистые сети появятся на автострадах, и тысячи автомобилей, оснащенных этой технологией, превратятся в сетевые узлы. На-

пример, фирма “Moteran” оснащает автомобили широкополосным оборудованием для ячеистых сетей, которые используются для связи и передачи развлекательной информации.

Преимущества ячеистых сетей. Невысокая стоимость инвестиций. Технология ячеистых сетей создает перспективы развертывания беспроводной среды, не требующей особого планирования архитектуры. В итоге создание беспроводной сети становится дешевле по сравнению с традиционными WLAN. Установка и подключение точки доступа обходится в сумму менее 500 дол. Поэтому БЯС вызывают большой интерес муниципалитетов и других организаций, имеющих ограниченный бюджет.

Значительное покрытие пользователей. Благодаря многоскачковой маршрутизации не требуется наличие прямой связности между абонентом и базовой станцией.

Быстрое развертывание и масштабируемость. Новый абонент может быть подключен к БЯС за несколько минут вместо месяцев, необходимых для построения новой кабельной сети. Поэтому БЯС найдут свое применение на выставках, конференциях и других мероприятиях.

Живучесть. БЯС обычно использует несколько шлюзов для подключения к Интернет, маршрутизаторы обеспечивают децентрализованное построение и поддержание маршрутов в зависимости от ситуации на сети. Особенность ячеистой сети – отсутствие центра управления, возможность самоорганизации и самоадаптации в соответствии с изменяющимися параметрами среды (автоматическое конфигурирование и реконфигурирование).

Высокая пропускная способность. Физические свойства беспроводных каналов таковы, что на более коротких расстояниях пропускная способность сети выше. Одним из способов повышения пропускной способности сети является передача данных через несколько ретрансляторов, находящихся на малых расстояниях. Поэтому БЯС может обеспечить повышение пропускной способности сети (при требовании меньшей мощности передатчика и удовлетворении при этом всем законодательным нормам, ограничивающим максимальную мощность передатчиков).

Пространственное разделение. Такое разделение является еще одним преимуществом БЯС по сравнению с одноузловыми сетями (устройств, совместно использующих одну точку доступа). В БЯС множество устройств могут подключаться одновременно через разные узлы. Малые расстояния передачи данных в БЯС позволяют уменьшить влияние помех и осуществлять одновременную передачу пространственно разделенных потоков данных.

Интеллектуальность. Интеллектуальность интегрирована непосредственно в БЯС и обеспечивает автоматизацию процесса администрирования и оперативного управления сетью. Точка доступа при включении автоматически обнаруживает другие точки доступа и “выясняет” свою роль в сети. Это исключает необходимость ручного администрирования сети и играет важную роль для оперативного развер-

тивания оборудования. Как только сеть запускается в эксплуатацию, она начинает автоматически управлять своей работой.

Проблемы создания и развития БЯС. Несмотря на большой потенциал БЯС, до сих пор остается ряд проблем, препятствующих их повсеместному распространению. Основные из них: функциональная совместимость; эффективность протоколов на каждом из уровней эталонной модели OSI; качество обслуживания передачи; управление сетью; безопасность передачи.

Функциональная совместимость. Распространению БЯС способствует ее способность взаимодействия с существующими сетевыми стандартами и протоколами (Ethernet, VPN, VLAN, OSPF и др.). Эта способность позволяет множеству БЯС разных производителей взаимодействовать на канальном и сетевом уровнях OSI, включая протоколы IPv4 и IPv6. Сеть должна объединять множество устройств с разными интерфейсами беспроводной связи. Поэтому в настоящее время в корпорации "Intel" ведутся работы по решению этой задачи на уровне устройств – разрабатываются перенастраиваемые радиопередающие системы, адаптирующиеся к любой среде беспроводной связи. Такой подход является существенно менее дорогостоящим, чем реализация нескольких беспроводных интерфейсов в каждом устройстве.

Физический уровень. На этом уровне БЯС должна отвечать следующим требованиям: адаптации радиоканала (минимизация ошибок за счет комбинации различных типов модуляции и способов кодирования); регулировке мощности передачи (с целью минимизации помех, минимизации задержки передачи и др.); наличию нескольких приемопередатчиков, использованию направленных антенн и др. В перспективе рассматривается применение программируемых радиосредств (soft radio), MIMO-технологий, сверхширокополосных сигналов (UWB) и др.

Канальный уровень. По сравнению с классическими беспроводными WLANs MAC-протоколы для БЯС требуют децентрализованного кооперативного функционирования узлов на расстояние, большее чем одна ретрансляция, и должны учитывать мобильность абонентов и направленность трафика (абонент–шлюз). Использование случайных протоколов доступа в БЯС неэффективно и поэтому перспективным являются: использование гибридных схем временного и кодового разделения каналов, нескольких каналов вместо одного (в одном маршрутизаторе несколько радиointерфейсов), а также интеграция в беспроводные маршрутизаторы различных протоколов (IEEE 802.11, IEEE 802.16, IEEE 802.15) и др.

Сетевой уровень (маршрутизация). Основная задача уровня – обеспечение передачи пакета от отправителя к адресату посредством нескольких ретрансляций. В этом отношении БЯС радикально отличаются от технологий 3G, WLANs, WMANs, использующих единственный беспроводный канал и поэтому не требующих сетевого уровня. В БЯС же (как и в MANET) узлы строят и поддерживают маршруты для передачи пакетов. В качестве основных требований к методам маршрутизации можно отнести следующие [16, 18]: масштабируемость, эффективность, надежность, адаптивность, обеспечение заданного качества обслуживания (QoS).

На сегодня значительное множество методов маршрутизации предложено для MANET [18]. Однако в MANET трафик может существовать между любой парой узлов и все узлы мобильны, тогда как в БЯС трафик имеет направленность (абонент—шлюз); кроме того, абоненты могут быть как мобильными, так и стационарными. Очевидно, что ряд протоколов маршрутизации, предложенных для MANET, с определенными доработками может быть использован и в БЯС [19]. Для максимизации производительности при передаче трафика могут применяться различные метрики, учитывающие полосу пропускания, уровень сигнала, его стабильность, задержку или другие параметры канала (узла).

Транспортный уровень. Протоколы транспортного уровня специально пока не предложены для БЯС. Однако значительное количество протоколов, предложенных для MANET, могут служить основой для создания протокола транспортного уровня, ориентированного на БЯС [20].

Управление сетью. Большинство из функций управления сетью должны быть реализованы в БЯС [1], например мониторинг сети, управление мощностью передачи и др.

Качество обслуживания. Различные приложения генерируют потоки данных различной интенсивности и имеют различные требования к пропускной способности [21]. Проблема — классификации и приоритизации трафика в узлах (и в объеме всей сети) для достижения максимальной производительности и обеспечения максимума удобств пользователей.

Безопасность БЯС. Безопасность определяется следующими особенностями: децентрализованной сетевой архитектурой, уязвимостью радиоканала и динамичностью топологии. Сервисы безопасности (секретность, подлинность, целостность, контроль доступа, неопровержимость) должны учитывать особенности СРС и обеспечиваться теми или иными механизмами безопасности с целью защиты от определенного множества атак [22, 23].

Таким образом, беспроводные ячеистые сети предлагают наиболее экономически выгодное и гибкое решение беспроводной связи. Хотя технология пока что находится в стадии развития, она уже демонстрирует значительный потенциал в области создания эффективных беспроводных вычислительных сред, отвечающих требованиям бизнеса, обладающих возможностью использования в домашних условиях, в промышленности и среди поставщиков услуг широкополосной связи.

Технология успешно сочетается с другими традиционными технологиями (3G, WLANs, WMANs). Основной ее недостаток — это относительная сложность ее комбинирования с другими беспроводными технологиями при сочетании функций хоста и маршрутизатора в каждом узле сети. Однако научные исследования последних лет свидетельствуют о скором создании эффективных беспроводных ячеистых сетей [24].

1.2.3. Сенсорные сети

В последние годы во всем мире все более пристальное внимание привлекают к себе “беспроводные сенсорные сети” (“Wireless Sensor Networks”, далее — просто

сенсорные сети). Основным их отличием от классических радиосетей является использование в качестве объектов сети большого числа сверхминиатюрных и дешевых устройств. Данный подход к формированию сети позволяет адаптировать сенсорные сети к решению чрезвычайно широкого спектра задач. В частности, одним из основных применений сенсорных сетей является создание разнообразных систем мониторинга и контроля. Следует ожидать, что в недалеком будущем сенсорные сети займут свою весьма обширную нишу среди имеющихся телекоммуникационных технологий, использующих беспроводную радиосвязь.

Сенсорные сети состоят из малогабаритных сенсорных узлов с интегрированными функциями мониторинга окружающей среды, обработки и передачи данных [12]. Основными элементами сенсорных узлов являются (рис. 1.11): датчики контроля физических параметров внешней среды, микрокомпьютер, батареи, приемопередатчик (возможно наличие системы позиционирования).



Рис. 1.11. Сенсорный узел

В конструктивном плане основным отличием сенсорных сетей от классических телекоммуникационных радиосетей является использование в качестве объектов сети большого числа сверхминиатюрных и дешевых устройств. Каждое устройство может содержать различные датчики физических параметров окружающей среды (освещенность, температура, влажность, давление, датчики вибраций и др.), а также средства для первичной обработки и хранения полученных данных. Количество объектов в такой сети теоретически определяется только областью применения и бюджетом и благодаря низкой цене отдельных устройств (порядка нескольких долларов и ниже) может быть весьма велико (порядка нескольких тысяч и выше). В эксплуатационном плане основными отличиями являются, во-первых, специфические системные требования (работа при различных внешних условиях, возможность случайных перемещений отдельных устройств и динамических изменений в топологии сети) и, во-вторых, жесткие реализационные ограничения (по энергопотреблению, вычислительной мощности встроенного процессора, объему встроенной памяти и др.). При этом скромные возможности отдельных объектов сети предназна-

ны в первую очередь для передачи небольших объемов информации с малой скоростью.

С учетом потребности в радиосвязи, ориентированной на устройства с низким энергопотреблением в 2003 г., организацией IEEE был принят стандарт IEEE 802.15.4, в котором определены физический и канальный уровни стека сетевых протоколов в беспроводных сетях, отвечающих данным запросам. В этом документе на физическом уровне определены три диапазона частот: 868, 910 МГц и 2,4 ГГц. В данном диапазоне определены 16 каналов шириной 5 МГц с такими несущими частотами:

$$F_c = 2405 + 5(k - 1) \text{ МГц}, k = 1, \dots, 16.$$

Скорость передачи в каждом канале составляет 250 Кб/с. Кроме того, на физическом уровне определены возможности включения/выключения передатчика, оценка уровня помех в канале, прием/передача данных, оценка уровня принимаемого сигнала. На канальном уровне найдены механизмы доступа к общей среде передачи данных, приведены общие рекомендации к построению топологии сети. В зависимости от требований предметной области такая сеть может работать в топологиях типа "точка-точка" или "звезда", причем топология типа "звезда" в полной мере отвечает описанному выше сценарию использования беспроводной сети.

Организация вышестоящих уровней в документе IEEE 802.15.4 не рассматривается, поэтому на данный момент доступно несколько вариантов организации полного стека сетевых протоколов, основанных на данном стандарте, в частности, WirelessHART, ISA100, ZigBee, из которых наиболее популярен ZigBee, добавляющий к IEEE 802.15.4 сетевой уровень и уровень приложений. На сетевом уровне ZigBee определены механизмы маршрутизации и управления сетью (формирование логической топологии сети).

Общая классификация тактических сенсорных сетей приведена на рис. 1.12.



Рис. 1.12. Классификация сенсорных сетей

Стационарные, подвижные и гибридные сенсорные сети. Можно использовать стационарные сенсорные узлы и подвижные сенсоры-роботы для сбора информации среди сенсорных узлов. Мобильные сенсорные сети относятся к классу MANET, а стационарные — к классу ячеистых беспроводных сетей (Wireless Mesh Network).

Децентрализованные, иерархические и гибридные сенсорные сети. Иерархическая организация сети допускает разбивку сети на зоны (кластеры) с выделением в каждой зоне главных и простых сенсоров-узлов, а также сенсоров-шлюзов (для связи между зонами). Она является комбинацией централизованного (в зонах) и децентрализованного (между главными узлами) способов управления.

Наземные, подземные, морские, воздушные сети. Примером таких сетей может служить развернутая на дне океана еще в 60-е годы прошлого века военным агентством DARPA подводная сенсорная сеть слежения за советскими подводными лодками.

Акустические, оптические, сейсмические, химические и другие подобные сети. В зависимости от среды мониторинга в сенсорах используют датчики, которые регистрируют определенные физические параметры (например, уровень радиации).

Преимущества технологий беспроводных сенсорных сетей могут быть эффективно использованы для решения различных прикладных задач, связанных с распределенным сбором, анализом и передачей информации.

1. Автоматизация процесса сбора данных внутри помещений: мониторинг температуры, расхода воздуха, присутствия людей и управление оборудованием для поддержания микроклимата; управление освещением; управление энергоснабжением; сбор показаний квартирных счетчиков газа, воды, электроэнергии и т.д.; охранно-пожарная сигнализация; мониторинг состояния несущих конструкций зданий и сооружений.

2. Дистанционный контроль и диагностика промышленного оборудования; техническое обслуживание оборудования по текущему состоянию (прогнозирование запаса надежности); мониторинг производственных процессов; телеметрия для исследований и др.

3. Мониторинг окружающей среды (загрязнений, сельское хозяйство и др.).



Рис. 1.13. Архитектура тактической сенсорной сети

4. Здравоохранение: мониторинг физиологического состояния пациентов, контроль местоположения и оповещение медицинского персонала.

5. Безопасность и оборона: контроль над перемещением людей и техники; контроль периметра и дальнейшее наблюдение; помощь в проведении спасательных операций; мониторинг имущества и ценностей; охранно-пожарная сигнализация, средства разведки. Архитектура тактической сенсорной сети приведена на рис. 1.13. Основные элементы (характеристики – в табл. 1.4) [25]: сенсорные узлы, шлюз, беспроводный мост, контролер.

Таблица 1.4

Характеристика	Сенсор	Тактический шлюз	Беспроводный мост	Контролер сети
Тип сети (протоколы)	Ad Hoc mesh	Ad Hoc mesh	Wi-Fi или UWB	Ad Hoc mesh Mil-STD 188-220
Скорость передачи	До 100 Кб/с	До 300 Кб/с	До 300 Кб/с	> 100 Кб/с
Наличие GPS	Да	Да	Да	Да
Безопасность	256 AES-шифрование	256 AES-шифрование	256 AES-шифрование	256 AES-шифрование
Типы сенсоров	Инфракрасный, акустический, температурный, вибрационный, магнитометр	–	–	–
Время жизни	30–45 суток	60–120 суток	60–120 суток	60–120 суток
Батареи	Типа АА	Нет данных	Нет данных	Типа АА
Дальность передачи	300 м на отрезке прямой видимости	0,5–6 км в зависимости от антенны и местности	1–7 км в зависимости от типа антенны и местности	До 300 м в зависимости от типа антенны
Размер	2,5 дюйма, диаметр × 6 (без антенны)	8×4×6 дюймов	8×4×6 дюймов без антенны	3, 250×4, 125×1, 12 дюйма без антенны
Вес	16 унций с батареями	4 фунта без батарей	4 фунта без батарей	1,2 фунта с батареями
Опции			Поддержка сотовых и радиотелефонов, солнечные батареи	

Сенсорные узлы тактических сетей должны быстро адаптироваться к частым изменениям топологии сети, трафика и эффективно использовать ограниченные сетевые ресурсы. В таких условиях обеспечить информационный обмен с заданным качеством невозможно без эффективной системы управления тактической сенсорной сетью [25].

1.2.4. Автомобильные сети

Среди приоритетных направлений развития необходимо отметить организацию связи транспортных средств на дорогах – решение этой задачи должно привести к построению целевых (или смешанных целевых/инфраструктурных) автомобильных беспроводных сетей. Создание подобных сетей, получивших в англоязычной литературе название VANET (Vehicular Ad Hoc Networks), представляется наиболее важной концепцией повышения эффективности и безопасности дорожного движения в будущем, а также увеличения доходов операторов связи [26] (рис. 1.14).

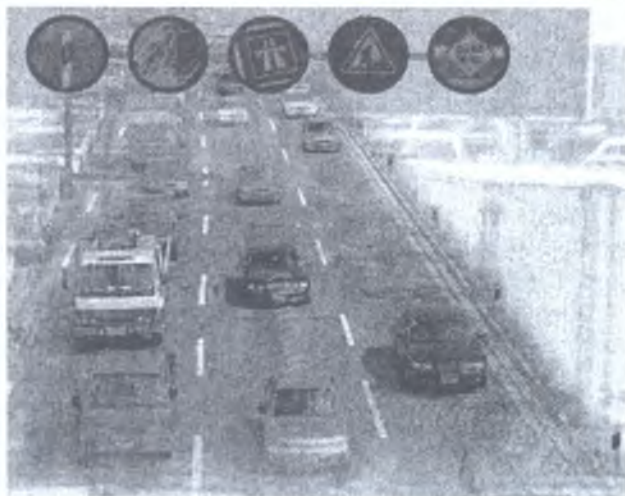


Рис. 1.14. Пример сети VANET

Сети VANET могут рассматриваться как частный случай сетей MANET, однако со следующими отличительными особенностями:

- 1) стремительные изменения топологии и частая фрагментация, что приводит к маленькому размеру эффективного сетевого диаметра;
- 2) переменный, сильно изменяющийся размер и плотность сети;
- 3) изменение поведение водителя как реакция на данные, получаемые из сети.

В свою очередь это ведет к изменениям топологии.

Рассмотрим основные приложения для автомобильных сетей.

Интеграция сетевого интерфейса, приемника глобального позиционирования, различных сенсоров и бортового компьютера представляет возможность построения мощной системы автомобильной безопасности, позволяющей собирать, обрабатывать и распространять информацию. В сети, образованной оборудованными таким образом транспортными средствами, при соответствующей инфраструктуре может быть развернуто большое количество приложений.

Все они могут относиться либо к безопасности, либо к комфорту (коммерческие).

В общем случае приложения могут быть разделены на четыре основные группы: машина—машина (car-to-car), машина—инфраструктура (car-to-infrastructure), машина—дом (car-to-home) и приложения, основанные на маршрутизации (routing based).

Приложения, относящиеся к обеспечению безопасности могут быть сгруппированы в три класса: помощь водителю (навигация, предотвращение столкновений и смена полос), информирование (об ограничении скорости или о зоне работ) и предупреждение (послеаварийные, о препятствиях или состоянии дороги). Одним из таких приложений могло бы стать уведомление о тревоге, например об экстренном торможении. В этом случае при дорожно-транспортном происшествии (срабатывании подушек безопасности) или внезапно резком торможении следующим сзади машинам передается уведомление. Такая же информация должна быть также получена машинами, движущимися в противоположном направлении, и автомобилями, которые потенциально могут попасть в аварию.

Другим примером может служить система совместной помощи водителю, использующая обмен данными, например, от сенсоров между машинами. Основная идея — расширение поля зрения водителя и представления дополнительной ему помощи посредством новых автономных приложений. С передачей этой информации автомобилям, следующим по той же дороге, водители получают информацию об опасности, препятствиях, транспортном потоке впереди, что в итоге приводит к эффективному и безопасному вождению.

Коммерческие приложения — их цель улучшить удобство пассажиров и повысить эффективность дорожного движения. Для достижения этих целей необходимо определение ближайших точек интереса (points of interest), получение информации о текущей загрузке дорог или погоде, а также интерактивная связь.

Другой пример приложений — получение данных от коммерческих транспортных средств и дорожной инфраструктуры о предоставляемых услугах (беспроводная реклама).

1.2.5. Гибридные сети

Локальная СРС открывает новые возможности расширения сетей мобильной связи на участке пользователя. Перемещающийся пользователь, имеющий доступ к такой сети, может пользоваться мобильным телефоном GPRS/UMTS в качестве шлюза к Интернету или корпоративной IP-сети. Что касается нагрузки в сети, то объем суммарного трафика от сети СРС обычно превышает объем трафика от мобильного телефона. Кроме того, если каждая сеть взаимодействует друг с другом, пропускная способность других сетей может быть повышена. На рис. 1.15 показан сценарий, в котором используются четыре СРС. При этом две сети PAN подсоединены к опорной IP-сети: одна — через точку доступа LAN, а вторая — через телефон GPRS/UMTS.



Рис. 1.15. Пример взаимодействия CPC

Устройства, входящие в сеть CPC, могут также использовать несколько различных технологий доступа. Например, портативный компьютер может использовать один из интерфейсов WLAN (Bluetooth, IEEE 802.11 или HiperLAN/2), обеспечивающий доступ к сети, когда компьютер находится внутри помещения. Сами принципы CPC позволяют объединять в ее рамках новые терминалы и новые технологии доступа. При этом отпадает необходимость в создании комбинированных терминалов, таких, как мобильные телефоны PDA, поскольку сеть CPC заменит собой интегрированные беспроводные устройства.

1.3. Преимущества и перспективы самоорганизующихся радиосетей

Основные различия в принципах построения и функционирования сотовых и самоорганизующихся сетей видны из рис. 1.16 и 1.17.



Рис. 1.16. Сотовые сети

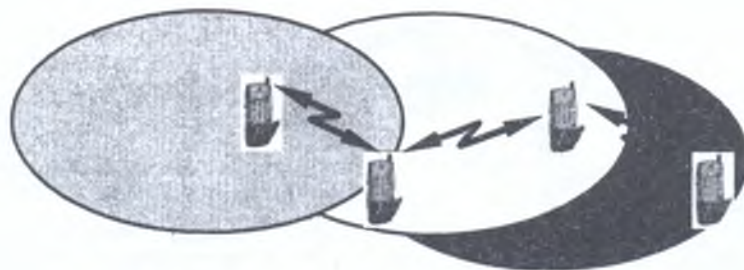


Рис. 1.17. Самоорганизующиеся радиосети

Сравнительный анализ вариантов построения сетей показывает ряд преимуществ самоорганизующихся радиосетей по сравнению с сотовыми и транкинговыми сетями (табл. 1.5).

Таблица 1.5

Характеристика	Сотовые сети	Транкинговые сети	Самоорганизующиеся радиосети
Архитектура	Фиксированная сотовая: фиксированные зоны обслуживания, стационарные базовые станции	Использование фиксированной сети для соединения базовых станций	Отсутствие фиксированной инфраструктуры, каждый узел является ретранслятором (маршрутизатором) сообщений
	Использование стационарной сети общего пользования		
Тип топологии	Статичная (базовые станции статичны)		Случайная, высоко динамичная адаптация топологии к условиям функционирования
Время развертывания	Очень большое	Значительное	Быстрое развертывание, самоорганизация сети, лёгкое наращивание
	Необходим этап проектирования (планирования) сети	Необходим этап планирования сети	
Тип управления	Централизованный, наличие отдельной (выделенной) сети управления		Децентрализованный, отсутствие выделенной сети управления
Мобильность	Мобильны только абоненты в пределах зон покрытия стационарными базовыми станциями		Мобильны все элементы сети
Живучесть	Очень низкая		Очень высокая
Разведзащищенность	Низкая		Высокая
Скорость передачи	Низкая – сотни Кб/с – единицы Мб/с		Высокая, 1–54 Мб/с

Чтобы понять место СРС в ряду других технологий, рассмотрим технологии беспроводной связи, включая современные системы сотовой связи, которые в значительной степени опираются на сетевую инфраструктуру: покрытие обеспечивается базовыми станциями, управление ресурсами радиопередачи осуществляется централизованно и услуги интегрированы в систему. На рис. 1.18 приведена классификация беспроводных технологий с точки зрения двух факторов – степени централизованности управления и использования многопролетной радиопередачи информации. По мере уменьшения централизованности управления сетью или вообще отказа от него мы приближаемся к сети, которая может быть однопролетной или многопролетной.

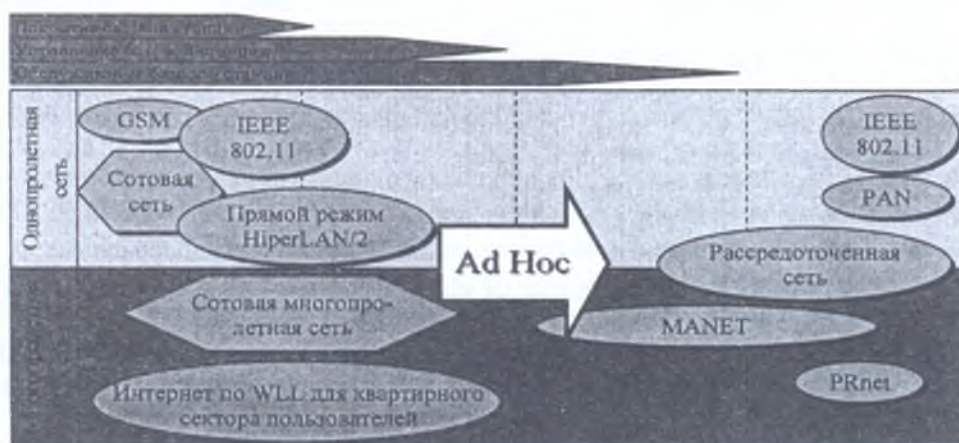


Рис. 1.18. Беспроводные сети с точки зрения степени централизованности управления (по горизонтали) и использования многопролетной радиопередачи (по вертикали)

Возможности современных беспроводных технологий и их основные параметры приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Технология	Теоретическая скорость	Частоты	Дальность	Мощность передатчика
IEEE 802.11b	1, 2, 5, 11 Мб/с	2,4 ГГц	25–100 м (внутри помещений); 100–500 м	~30 мВт
IEEE 802.11g	54 Мб/с	2,4 ГГц	25–50 м (внутри помещений)	~79 мВт
IEEE 802.11a	6, 9, 12, 24, 36, 48 и 54 Мб/с	5 ГГц	10–40 м (внутри помещений)	40 мВт, 250 мВт или 1 Вт
Bluetooth (IEEE 802.15.1)	1 Мб/с (v1.1)	2,4 ГГц	10 м (максимально 100 м)	1 мВт (максимально 100 мВ)

Окончание табл. 1.6

Технология	Теоретическая скорость	Частоты	Дальность	Мощность передатчика
UWB (IEEE 802.15.3)	110–480 Мб/с	3–10 ГГц	~ 10 м	100 мВт, 250 мВт
IEEE 802.15.4 (например, Zigbee)	20, 40 или 250 Кб/с	868 МГц, 915 МГц или 2,4 ГГц	10–100 м	1 мВт
HiperLAN2	макс 54 Мб/с	5 ГГц	30–150 м	200 мВт или 1 Вт
IrDA	макс 4 Мб/с	Инфракрасный (850 нм)	–10 м (прямая видимость)	Определяется расстоянием
HomeRF	1 Мб/с (v1.0), 10 Мб/с (v2.0)	2.4 ГГц	–50 м	100 мВт
IEEE 802.16 IEEE 802.16a IEEE 802.16e (Broadband Wireless)	134 Мб/с, 75 Мб/с up to 15 Мб/с	10–66 ГГц < 11 ГГц < 6 ГГц	2–5 км 7–10 км (максимально 50 км) 2–5 км	Управление мощностью

Уже сейчас можно привести примеры использования беспроводных локальных и городских сетей, которые основываются на использовании протоколов IEEE 802.11, HiperLAN2, Bluetooth и др. Дальнейшее развитие беспроводных технологий предусматривает введение сети MANET как составной сетей связи четвертого поколения 4G – так называемые сотовые/самоорганизующиеся (гибридные) сети (рис. 1.19).

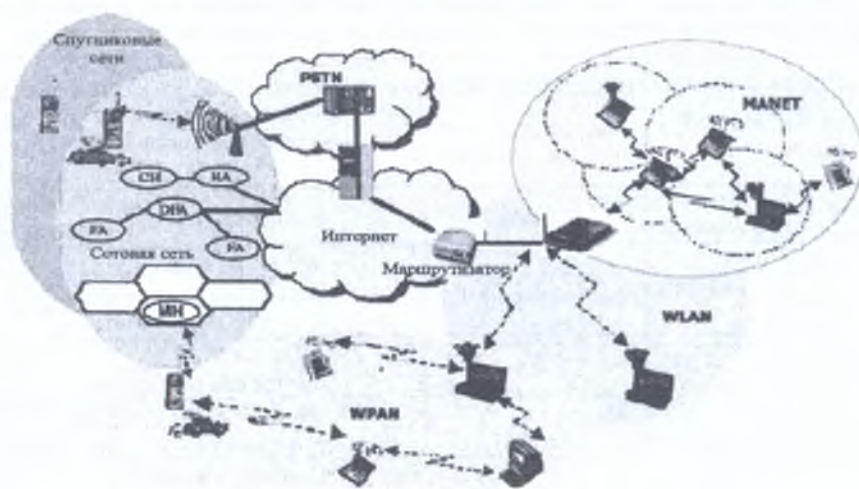


Рис. 1.19. 4G сети

1.4. Выводы

Одним из перспективных направлений развития четвертого поколения сетей связи является создание и развитие самоорганизующихся радиосетей.

Данные сети применяются в качестве:

- 1) сетей радиосвязи военного назначения (в основном тактического уровня);
- 2) сетей, создаваемые в условиях природных катаклизмов, а также при выходе из строя сетей общего пользования;
- 3) сетей аварийных и муниципальных служб;
- 4) сетей телеметрии (сенсорные сети), предназначенные для мониторинга и передачи параметров окружающей среды (военного, промышленного, аграрного, природного и домашнего применения);
- 5) сетей, создаваемых при проведении конференций, соревнований, олимпиад и т.п.;
- 6) сетей обучения и игровые сети;
- 7) автомобильных сетей;
- 8) коммерческих сетей и др.

К основным параметрам СРС можно отнести: количество и мобильность узлов сети, размеры сети (географической территории) и плотность размещения узлов; связность; сетевую топологию, тип трафика и особенности внешней среды.

Самоорганизующиеся радиосети характеризуются:

- динамичной топологией (узлы сети мобильны, подвержены уничтожению и отказам; каналы радиосвязи нестабильны, ограничены по дальности связи и пропускной способности из-за помех, условий распространения радиоволн и т.д.);
- ограниченной энергетической возможностью узлов, оснащенных батареями;
- различной размерностью (десятки, сотни и тысячи узлов);
- неоднородностью по мощности передачи и мобильности (отдельный абонент, транспортное средство, вертолет, самолет);
- ограниченной безопасностью из-за широкополосной природы радиоканала и др.

Узлы самоорганизующейся радиосети должны быстро адаптироваться к частым изменениям топологии и эффективно использовать ограниченные сетевые ресурсы. В таких условиях обеспечить информационный обмен с заданным качеством невозможно без эффективной системы управления сетью. Анализ и разработке эффективных методов и алгоритмов управления посвящены последующие главы книги.

Список литературы

1. Дымарский Я.С., Крутжкова Н.П., Яновский Г.Г. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи. — М.: НТЦ "Мобильные коммуникации", 2003. — 384 с.
2. Гребешков А.Ю. Стандарты и технологии управления сетями связи. — М.: Эко-Трендз, 2003. — 288 с.

3. Kahn R. Advances in Packet Radio Technology // Proc. of the IEEE. – 1978. – 66. – P. 1468–1496.
4. Бунин С.Г., Войтер А.П. Вычислительные сети с пакетной радиосвязью. – К.: Техніка, 1989. – 223 с.
5. 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. – 75, № 1. – С. 68–90.
6. Fifer W., Bruno F. The Low-Cost Packet Radio // Proc. of the IEEE – 1987. – 75 (1). – P. 33–42.
7. Sharret I.P. WIN-T—The Army's New Tactical Intranet // IEEE MILCOM. – 1999. – P. 45.04.01–45.04.05.
8. Шиллер Й. Мобильные коммуникации / Пер. с англ. – М.: Изд. дом “Вильямс”, 2002. – 384 с.
9. Freebersyser J., Leiner B. A DoD Perspective on Mobile Ad Hoc Networks // Ad Hoc Networking. – 2001. – 25. – P. 147–152.
10. Sass P. Communications Networks for the Force XXI Digitized Battlefield // ACM/Baltzer Mobile Networks and Applications Journal. – 1999. – 4. – P 450–455.
11. Міночкін А.І., Романюк В.А. Архітектура перспективної мобільної компоненти тактичних мереж зв'язку збройних сил України // 36. наук. праць. – К.: ВІПІ НТУУ “КПІ”, 2004. – № 5. – С. 107–115.
12. Жук О.В., Міночкін А.І., Романюк В.А. Перспективи розвитку тактичних сенсорних мереж // 36. наук. праць ВІПІ НТУУ “КПІ”, 2007. – № 2. – С. 111–119.
13. Ілюшко В.М., Нарытник Т.Н. Система передачі даних на базі висотного беспилотного летального апарату (СПД Фазтон) // Зв'язок. – 2004. – № 7. – С. 38–39.
14. Міночкін А.І., Романюк В.А. Методи множественного доступу в мобільних радіосетях // Там же. – 2004. – № 2. – С. 46–50.
15. Sichertiu M.L. Wireless mesh networks: opportunities and challenges / Sichertiu M.L. // Proc. of the Wireless World Congress. – 2005. – P. 263–268.
16. Akyildiz F., Wang X. A Survey on Wireless Mesh Networks // IEEE Communications Magazine. – 2005. – 43, N 9. – P. 412–418.
17. Міночкін А.І., Романюк В.А. Методологія оперативного управління мобільними радіосетями // Зв'язок. – 2005. – № 2. – С. 53–58.
18. Міночкін А.І., Романюк В.А. Маршрутизація в мобільних радіосетях – проблема и пути ее решения // Там же. – 2006. – № 3. – С. 42–50.
19. Ramachandram K.N., Buddhikot M.M., Miller S. On design and implementation of infrastructure mesh networks // Proc. of WiMesh'05. – 2005. – P. 785–790.
20. Міночкін А.І., Романюк В.А., Сова О.Я. Аналіз методів управління навантаженням в мобільних радіомережах на транспортному рівні моделі OSI // 36. наук. праць ВІПІ НТУУ “КПІ”. – 2006. – № 3. – С. 55–65.
21. Міночкін А.І., Романюк В.А. Управление качеством обслуживания в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2005. – № 8. – С. 17–23.
22. Salem N.B., Hubaux J.-P. Securing Wireless Mesh Networks // IEEE Wireless Communications. – 2006. – 13, N 2. – P. 625–631.

23. *Міночкін А.І., Романюк В.А., Шаціло П.В.* Виявлення атак в мобільних радіомереж // 36. наук. праць ВІТІ НТУУ "КПІ", 2005. – № 1. – С. 102–111.
24. *Бунин С.Г., Міночкін А.И., Романюк В.А.* Перспективы беспроводных ячеистых сетей // Зв'язок. – 2007. – № 5. – С. 20–24.
25. *Міночкін А.І., Романюк В.А.* Методологія управління тактичними сенсорними мережами // IV Наук.-практ. конф. ВІТІ "Проблеми телекомунікацій". – К.: ВІТІ НТУУ "КПІ", 2008. – С. 15–26.
26. *Кучерявий Е.А., Винель А.В., Ярцев С.В.* Особенности развития и текущие проблемы автомобильных сетей VANET // Электросвязь. – 2009. – № 1. – С. 24–28.

ГЛАВА 2

МАРШРУТИЗАЦИЯ В САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ РАДИОСЕТЯХ

2.1. Анализ методов маршрутизации

2.1.1. Анализ методов маршрутизации в стационарных сетях

Под методом маршрутизации (ММ) будем понимать совокупность правил (процедур), определяющих образование, поддержание маршрутов передачи между отправителем и адресатом в сетях связи и обеспечивающих эффективное использование сетевых ресурсов при заданном качестве обслуживания пользователей. Эта последовательность действий может учитывать достижимость отдельных узлов (элементов сети), частоту ошибок при передаче данных, длины очередей пакетов к выходящим каналам, оценки задержек пакетов на различных маршрутах и т.д. Соответствующие решения могут приниматься во время установления каждого логического соединения между отправителем и адресатом данных (режим виртуальных каналов) или независимо для каждого пакета (дейтаграммный режим).

Целью маршрутизации является нахождение такого пути (или совокупности путей) между источником и адресатом, который обеспечит эффективное использование сетевых ресурсов и заданное качество обслуживания пользователей. Все многообразие методов маршрутизации можно разделить по следующим признакам [1–12]: использование маршрутных таблиц; частота принятия решения; способ принятия решения; место использования метода в сети; необходимая информация для принятия решений.

Рассмотрим более подробно данную классификацию и кратко охарактеризуем методы маршрутизации, используемые в настоящее время в стационарных сетях передачи данных (рис. 2.1).

1. Прежде всего, необходимо отметить, что большинство методов маршрутизации используют маршрутные таблицы для хранения информации о всех изменениях конфигурации сети. Но существуют и такие способы продвижения пакетов в сети, которые не требуют наличия таблиц маршрутизации в сети, т.е. никаких попыток запоминать маршрут не предпринимается. Вместо этого узлы отслеживают лишь сам факт прохождения через них отдельных пакетов и принимают решение о том, следует ли передавать их дальше (обычно на основании того, проходил ли ранее пакет или нет).

ких методах решения по выбору маршрутов вообще не изменяются, маршрут каждого сообщения известен заранее до его входа в сеть и определяется вручную администратором сети. В каждом узле имеется список каналов, по которым может быть передан пакет с данным адресом. Список составляется с учетом предпочтения каналов. Узлы не обмениваются информацией, способствующей выбору и изменению маршрутов, и не производятся соответствующие измерения в отдельных узлах. Другими словами, не учитываются изменения условий работы сети. Преимуществом таких методов является простота их реализации. Однако при существенных изменениях состояния сети администратору необходимо срочно ввести изменения в маршрутные таблицы, иначе сеть перестанет работать корректно.

В *квазистатических* методах совокупность локальных маршрутных таблиц не фиксирована раз и навсегда (как в статических методах), а меняется при изменении интенсивностей входных потоков (хотя и довольно медленно).

В *адаптивных* (динамических) методах маршрут заранее не известен, а на каждом узле направление дальнейшей передачи выбирается исходя из текущей информации. При адаптивной маршрутизации в узлах сети анализируются изменения условий передачи пакетов и обрабатывается статистика использования различных маршрутов. На основании этого производится выбор маршрута. Кроме дополнительного расхода ресурсов сети, связанных с анализом ситуаций в сети, передачей маршрутной информации и корректированием маршрутных таблиц, адаптивная маршрутизация может вызвать нежелательные колебания нагрузки в каналах и закливание пакетов на маршрутах.

Стратегия принятия решений включает в себя формулу маршрутизации [6, 12] для количественного выражения стоимости пути и построения маршрутных таблиц, а также частоту корректировки маршрутных таблиц. Стоимость пути есть сумма стоимостей составляющих его каналов. Если все каналы одинаковы, то в качестве стоимости пути используется число переприемов. В других сетях стоимость каналов может изменяться в зависимости от измеренной частоты ошибок, перегрузок в канале, его пропускной способности, измеренной задержки пакета в очереди на передачу и т.д. Когда говорят о кратчайшем пути, то имеют в виду путь минимальной стоимости.

3. Адаптивные протоколы маршрутизации, применяемые в стационарных сетях, делятся на две группы:

1) дистанционно-векторные алгоритмы DVA (Distance Vector Algorithms) – каждый маршрутизатор периодически и широковещательно рассылает соседним маршрутизаторам вектор, компонентами которого являются расстояния от данного маршрутизатора до всех известных ему маршрутизаторов (сетей). Эти алгоритмы хорошо работают только в небольших сетях. В больших сетях они заполняют сеть интенсивным служебным трафиком, к тому же изменения конфигурации не всегда корректно могут обрабатываться алгоритмом этого типа, так как маршрутизаторы не имеют точного представления о топологии связей в сети, а располагают только

обобщенной информацией – вектором дистанций, например RIP (Routing Information Protocol);

2) алгоритмы состояния связей LSA (Link State Algorithms), которые обеспечивают каждый маршрутизатор информацией, достаточной для построения точного графа связей сети, путем обмена короткими HELLO-пакетами со своими ближайшими соседями (методом лавинной рассылки). В отличие от протоколов DVA объявления о состоянии связей протоколов LSA не повторяются периодически, а передаются только в том случае, когда с помощью сообщений HELLO было установлено изменение состояния какой-либо связи (сетевой топологии). В результате объемы служебного трафика при использовании протоколов LSA (например, OSPF (Open Shortest Path First)) гораздо меньше, чем при использовании протоколов DVA.

4. В зависимости от способа принятия решений адаптивные ММ можно классифицировать как централизованные, распределенные и иерархические. При *централизованных* адаптивных методах все указания об изменении маршрутов разрабатываются центром управления сетью (ЦУС), находящемуся в некотором узле сети (отдельном маршрутизаторе), куда передается информация о состоянии сети. Затем этот узел рассылает маршрутные таблицы по сети, чтобы каждый маршрутизатор получил собственную таблицу и в дальнейшем самостоятельно принимал решение по поиску маршрутов для передачи информации.

При *распределенных* адаптивных методах выбор маршрута в каждом узле производится самостоятельно на основании данных, получаемых по протоколу маршрутизации от остальных маршрутизаторов сети.

Иерархические адаптивные методы разрабатываются в основном для крупномасштабных сетей с большим количеством узлов. При этом сеть делится на регионы, в каждом из которых имеется центр измерений и управления. Центр собирает информацию о состоянии своего региона и обменивается этой информацией со всеми региональными центрами, которые вырабатывают указания об изменении маршрутов и передают их в узлы своих регионов.

Опыт показал, что централизованные методы более эффективны в глобальном смысле, так как выбор маршрутов в каждом узле последовательно основывается на состоянии всей сети. Методы распределенной маршрутизации эффективны в основном в локальных участках; решения, принимаемые в отдельных узлах, часто оказываются несогласованными, возникает закливание пакетов. С другой стороны, эти методы быстро реагируют на изменение потоков данных и ресурсов в локальных участках сети.

5. Сеть Интернет, кроме организационной структуры, определяющей деление глобальной сети на сети различных поставщиков услуг, состоит также из автономных систем – это совокупность сетей под единым административным управлением, обеспечивающим общую для всех маршрутизаторов (относящихся к некоторой автономной системе) политику маршрутизации. Автономные системы связываются при помощи внешних шлюзов (маршрутизаторов), использующих некоторый про-

токол маршрутизации, причем только один – в отличие от маршрутизаторов внутри автономной системы. Поэтому в зависимости от места работы протоколов маршрутизации в сети различают внешние и внутренние шлюзовые протоколы маршрутизации.

Внешние шлюзовые протоколы отвечают за выбор маршрута между автономными системами. В качестве адреса следующего маршрутизатора указывается адрес точки входа в соседнюю автономную систему.

Основным внешним шлюзовым протоколом в сети Интернет на сегодняшний день является BGPv4 (Border Gateway Protocol), который пришел на смену протоколу EGP (Exterior Gateway Protocol) с целью устранения эффекта заикливания маршрутов. Преимущество протокола BGPv4 заключается в успешной работе при любой топологии связей между автономными системами, что соответствует нынешнему состоянию Интернета. Однако для взаимодействия маршрутизаторов по протоколу BGPv4 необходимо их конфигурирование администратором в ручном режиме.

Протокол ICMP (Internet Control Message Protocol) используется в сети Интернет как вспомогательный для оповещения отправителя о “несчастных случаях”, происшедших с его пакетом в процессе передачи, а также для мониторинга сети (утилиты *ping* и *tracert*).

Внутренние шлюзовые протоколы отвечают за маршрут внутри автономной системы. В случае транзитной автономной системы эти протоколы указывают точную последовательность маршрутизаторов от точки входа в автономную систему до точки выхода из нее.

Протокол RIP (Route Information Protocol) является внутренним протоколом маршрутизации дистанционно-векторного типа, использующий для поиска кратчайшего пути алгоритм Беллмана–Форда. Для измерения расстояния до сети стандарты протокола RIP допускают различные виды метрик: значение пропускной способности, время задержки, надежность сетей, количество ретрансляций, а также комбинации этих метрик. Преимущество протокола RIP заключается в его простоте, но это приводит к осложнениям в работе протокола в случае потери какого-либо маршрута. Это связано с тем, что в формате сообщения протокола RIP нет поля, указывающего, что пути к данной сети больше не существует. Еще один недостаток протокола RIP – заикливание маршрутов.

Протокол OSPF (Open Shortest Path First) построен на базе алгоритма состояния связей и работает в два этапа. На первом этапе каждый маршрутизатор строит граф связей сети, в котором вершинами графа являются маршрутизаторы, а ребрами – интерфейсы маршрутизаторов. Второй этап состоит в нахождении оптимальных маршрутов с помощью полученного графа (с помощью алгоритма Дейкстры). Основным недостатком протокола OSPF является значительное возрастание вычислительной сложности с увеличением размерности сети.

6. В зависимости от информации, используемой для принятия решения, адаптивные методы маршрутизации делятся на *изолированные* и *кооперированные*. *Изоли-*

рованные методы действуют в каждом узле независимо и используют лишь информацию о состоянии своего собственного узла и его выходных каналов. При *кооперированных* методах узлы обмениваются служебной информацией для выбора маршрутов передачи данных. Они обеспечивают быструю адаптацию, надежность и гибкость маршрутизации, но требуют передачи служебной информации между узлами сети и памяти для ее запоминания, т.е. используют часть ресурса сети. С увеличением размерности сети затраты ее ресурсов значительно возрастают.

Существуют различные варианты обмена служебной информацией при кооперированной маршрутизации. Например, узлы могут сообщать о длинах очередей пакетов на выходящие каналы векторами оцененных минимальных задержек пакетов ко всем узлам сети. Такой обмен может быть периодическим или аperiodическим. При любой кооперированной маршрутизации выполняются следующие четыре функции:

- состояние каждого отдельного узла сообщается соседним узлам или центру маршрутизации сети;
- на основании этих сообщений формируется общее состояние сети;
- производится выбор оптимальных маршрутов с учетом общего состояния сети;
- корректируются маршрутные таблицы в узлах сети.

В целом адаптивные ММ являются приближением, часто довольно грубым, к оптимальной маршрутизации по критерию минимального среднего времени доставки пакетов в сети. Причина этого в том, что не учитывается влияние текущих действий на состояние сети в будущем. Как правило, перегружается основной (наиболее предпочтительный маршрут) и недостаточно используются альтернативные (обходные) маршруты.

При построении методов маршрутизации обычно стремятся выполнить следующие основные требования [4–8]: минимальное среднее время доставки пакета в сети, адаптация к возможным изменениям нагрузки в сети на маршрутах от отправителя к адресату, быстрая реакция на изменения топологии сети, препятствование закликиванию пакетов, достаточная простота, минимальные аппаратные и программные затраты для своей реализации.

Теоретически идеальным является метод динамической маршрутизации, основанный на глобальном учете состояния сети. Однако возрастание скорости адаптации метода приводит к увеличению загруженности каналов передачи служебной информацией. Поэтому на практике в сетях передачи данных используют адаптивные методы маршрутизации. Адаптивная маршрутизация должна удовлетворять требованиям адаптации к колебаниям нагрузки и изменениям структуры сети, обеспечивать отсутствие циклов в маршруте и осуществление обходов вокруг зон перегрузки сети. Она включает в себя следующие функции (рис. 2.2): контроль состояния сети; сбор служебной информации о состоянии сети в месте принятия решения; хранение маршрутов; вычисление маршрутов; ретрансляцию пакетов [6, 8, 12].



Рис. 2.2. Функции адаптивных методов маршрутизации

1°. Контроль состояния сети. Переменными, отражающими состояние сети и используемыми для вычисления маршрутов, являются: топологическая связность, структура трафика, задержка, качество каналов. Будем различать локальное, глобальное и частичное состояния. Чтобы определить локальную связность, каждый узел должен контролировать состояние смежных каналов и (или) узлов, отслеживая трафик в канале или (при отсутствии трафика) периодически опрашивать соседей. Нагрузка локального трафика контролируется с помощью измерения соответствующих параметров, называемых *метриками*. Метрикой может быть либо пропускная способность канала, его загрузка на текущий момент (средняя или мгновенная длина очередей), либо задержка информации при ее прохождении по этому каналу и т.д.

Многие протоколы маршрутизации (например, IGRP) предусматривают широкий диапазон значений метрик, что позволяет проводить их точную настройку в больших сетях с меняющейся производительностью и топологией. Вместо простой метрики маршрута между узлами i и j эти протоколы используют обобщенную метрику c_{ij} , которая служит для более точной оценки маршрута:

$$c_{ij} = r((k_1/B_e) + (k_2t_s)),$$

где r – надежность (процент информации, успешно переданной следующему узлу); k_1, k_2 – константы, которые по сути являются весовыми коэффициентами пропускной способности и задержки; B_e – эффективная пропускная способность, которая определяется как произведение полосы пропускания на загруженность канала; t_s – время задержки.

Маршрут, имеющий меньшую обобщенную метрику, будет наиболее предпочтительным. Если к одному получателю есть несколько маршрутов, в протоколе IGRP реализована возможность передачи трафика по всем или нескольким маршрутам (многомаршрутная передача). Например, если один маршрут имеет обобщенную метрику 1, а другой – 3, то через маршрут с метрикой 1 будет передано в

три раза больше данных. Однако используются только те маршруты, обобщенные метрики которых находятся в определенном диапазоне.

Глобальное состояние, определяющееся информацией о связности и структуре трафика всей сети, может быть оценено с помощью сбора и сопоставления локальной информации, поступающей из всех узлов сети. Частичное состояние (по отношению к заданному узлу) находится на некотором промежуточном уровне между глобальным и локальным состояниями. Оно является состоянием сети с "точки зрения данного узла" и включает все элементы, необходимые для принятия маршрутных решений в этом узле.

Существует тесная связь между методами определения состояния сети и классами методов маршрутизации. Так, изолированная стратегия маршрутизации основана на локальной информации о состоянии сети, и распределена на частичной информации о состоянии сети, а централизованная требует определения локальной информации во всех узлах и глобальной информации о состоянии сети в ЦУС. На основе качественного анализа методов маршрутизации можно утверждать, что глобальная информация запаздывает больше (или менее актуальна по отношению к реальной ситуации на сети) и создает больший дополнительный служебный трафик. Однако эта информация имеет большую глобальность с точки зрения реального состояния сети в целом. Поэтому вероятность образования "петель" сводится к минимуму, и методы, использующие глобальную информацию о состоянии сети, обладают хорошей приспособляемостью (реакцией) к перегрузкам сети и стохастическому изменению структуры сети.

2°. Сбор информации о состоянии сети (рассылка маршрутной информации). Результаты измерений состояния сети могут либо обрабатываться локально, либо передаваться на собирающий центр для дальнейшей обработки. В случае централизованной маршрутизации результаты локальных измерений периодически сообщаются в ЦУС и обобщаются для получения глобальной информации о состоянии сети. При распределенной маршрутизации результаты локальных измерений комбинируются с информацией, полученной из соседних узлов, и используются для корректировки частичной информации о состоянии сети (для данного узла); далее частичная информация передается соседним узлам. Эта информация может передаваться узлам синхронно или асинхронно, периодически или только в случае ее изменения (рассылка по событиям). В случае изолированной стратегии маршрутизации результаты измерений обрабатываются и используются локально (между узлами нет обмена информацией о состоянии).

3°. Хранение маршрутов. Существуют несколько возможностей хранения маршрутной информации в узлах. Наиболее общее решение состоит в том, чтобы в узле i ($i = 1, \dots, N$) хранить матрицу размерности $N \times N_i$ (где N — общее число узлов; N_i — число соседей узла i), записи которой являются долями направляемого данному адресату суммарного трафика, который должен быть распределен по различным соседним узлам (многопутевая маршрутизация).

Еще один способ хранения маршрутной информации в узлах состоит в том, что узел i ($i = 1, \dots, N$) хранит всю матрицу связей между узлами, но это требует $O(N^2)$ памяти. Зато при использовании такой матрицы можно вычислить и кратчайшие пути, а не только их длины.

Маршрутные таблицы либо вычисляются локально (распределенная маршрутизация), либо управляются централизованно (централизованная маршрутизация).

4°. **Вычисление маршрутов.** Как правило, выбор маршрута выполняется по критерию пути минимальной стоимости (кратчайшего пути) следования к адресату на основе информации о состоянии сети, доступной данному узлу. При использовании изолированной стратегии каждый узел содержит сведения о состоянии своих собственных очередей. Он также хранит предварительно вычисленный список предпочтительных для данного адресата выходных линий (упорядоченных по приоритету). Стратегия состоит в маршрутизации пакетов по наиболее приоритетному каналу до тех пор, пока длина очереди не превысит заданного порогового значения. Далее используется канал второго приоритета и т.д. В распределенной стратегии узлы выбирают кратчайшие пути до каждого адресата на основе имеющейся в них информации:

- каждый узел сети располагает частичной информацией о состоянии сети. В этом случае каждый узел хранит для каждого из N узлов сети число, которое представляет собой значение цены известных кратчайших путей к этому узлу. Обмен этой информацией позволяет узлам итеративно вычислять пути минимальной цены ко всем узлам сети, используя метод Беллмана—Форда (в сети Интернет протоколы маршрутизации RIP, IGRP [1–3]);

- каждый узел сети располагает глобальной информацией о состоянии сети. В этом случае каждый узел передает всем другим узлам сети список имеющихся у него линий и их стоимость. Используя эту информацию, каждый узел может выполнить любой централизованный метод поиска кратчайшего пути. Так, например, работает сеть Интернет (протокол маршрутизации OSPF [1, 3]), в котором кратчайший путь вычисляется по методу Дейкстры.

При централизованной стратегии ЦУС владеет глобальной информацией о состоянии сети и периодически вычисляет наилучшие маршруты между всеми парами узлов. При этом в узлах не требуется никаких вычислений.

5°. **Ретрансляция пакетов.** Ретрансляция пакетов — это процесс, происходящий в каждом промежуточном узле и включающий в себя анализ заголовка каждого входящего пакета, опрос маршрутной таблицы, помещение пакета в соответствующую очередь и его передача. Будем различать механизмы передачи для виртуальных каналов и дейтаграмм. В режиме виртуального канала отправитель и адресат устанавливают виртуальный канал и маршрут между ними фиксируется на время сеанса. Все пакеты используют этот путь. Решение об изменении маршрута между данной парой отправитель—получатель может приниматься только до начала сеанса связи.

В дейтаграммном режиме передача пакетов по маршруту может осуществляться следующими способами:

- “последовательная” маршрутизация, при которой в заголовке передается только идентификатор узла-адресата и следующий транзитный участок определяется с помощью маршрутной таблицы. Каждый узел в пути от источника к адресату выполняет эту процедуру;

- маршрутизация отправителем, при которой сведения обо всем пути (т.е. идентификаторы промежуточных узлов) предварительно проставляются в маршрутной части заголовка каждого пакета в узле источника. При топологических изменениях, заставляющих изменять маршрут от источника к адресату, любой промежуточный узел, обнаружив отсутствие связности, может: 1) пересчитать новый маршрут к месту назначения или 2) “забыть” о маршруте источника и отправить пакет, используя “последовательную маршрутизацию”;

- широковещательная передача, которая предполагает передачу пакета всем узлам;

- многопутевая передача, предусматривающая распределение трафика по нескольким маршрутам.

Таким образом, можно отметить, что ключевыми вопросами при разработке новых методов маршрутизации являются: “какую информацию собирать о состоянии сети?”, “как часто?”, “каким образом?”, “в каком виде ее хранить?” и “как использовать?”. Кроме того, методы маршрутизации должны отвечать ряду важных требований. Во-первых, ММ должны обеспечивать построение рациональных маршрутов для передачи трафика с заданным качеством; во-вторых, ММ должны быть достаточно простыми (не требовать слишком большого объема вычислений и передачи значительного количества служебного трафика); в-третьих, ММ должны обладать свойством сходимости (всегда приводить к согласованному построению маршрутных таблиц за приемлемое время).

2.1.2. Схема системного анализа и синтеза методов маршрутизации в СРС

Начало работ по исследованию методов маршрутизации в СРС положил в 70–80-е годы проект DARPA PRNET (Defense Advanced Research Project Agency Packet Radio Networks) [13]. В настоящее время многочисленные методы разработаны рабочей исследовательской группой IETF (Internet Engineering Task Force) [14] для сетей MANET. Целью данной рабочей группы является стандартизация методов маршрутизации, которые, используя традиционные IP-сервисы, обеспечивали эффективную маршрутизацию в мобильных радиосетях с динамичной топологией. Внедрение протокола IPv6 позволит создать в Интернет гибкую и масштабируемую структуру маршрутизации за счет иерархической адресации [15]. Однако до конца не решенной остается проблема создания эффективных методов маршрутизации IP-пакетов мобильных хостов в сетях Интернет, так как существующие методы (включая IP, Netware IPX, ISO CLNP, AppleTalk) не поддерживают мобильные хосты.

Все методы маршрутизации, предложенные для применения в СРС, можно классифицировать по следующим признакам (рис. 2.3) [16]:

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



Рис. 2.3. Классификация методов маршрутизации в СРС

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.

Табличные методы маршрутизации предполагают построение и поддержание маршрута в узлах сети на основе ведения ними маршрутных таблиц и обмена маршрутными сообщениями между узлами. При этом различают два основных класса, определяемых используемым алгоритмом поиска кратчайшего пути (Дijkstra или Беллмана–Форда).

С помощью *зондовых* методов маршрутизации строят и обновляют маршруты на основе зондирования сети специальными служебными пакетами (зондами).

При необходимости передачи в сети информации от одного абонента к нескольким (всем) получателям возникает необходимость *групповой (волновой)* маршрутизации.

В зависимости от параметров, учитываемых при выборе маршрута, различают *одно- или многопараметрические* методы маршрутизации.

Если необходимо строить и поддерживать несколько маршрутов передачи (например, требование по безопасности передачи), то говорят о *многопутевой* маршрутизации.

В зависимости от типа радиоканалов (из-за неоднородной мощности передачи узлов) возможно применение *асимметричной* маршрутизации между парами отправитель—адресат.

При росте размерности сети до сотни и тысячи абонентов возникает задача введения иерархии управления сетью и, соответственно, *иерархической* маршрутизации.

Если принятие решения по маршрутизации реализовано на основе использования базы знаний, то говорят об *активной* или *интеллектуальной* маршрутизации.

При наличии в узлах сети системы позиционирования возможно применение методов *координатной* или географической маршрутизации.

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, которая состоит из стоимостей всех каналов маршрута. При этом методы маршрутизации должны [17]:

- соответствовать особенностям СРС;
- удовлетворять ряду обязательных (опционных) требований $\{TR_q\}$, $q = \overline{1, Q}$, например, TR_1 – децентрализованное функционирование (обязательно); TR_2 – быстрая сходимость и отсутствие заикливания маршрутов (обязательно); TR_3 – минимальная загрузка сети служебной информацией (может выступать 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, задержке 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 СРС $U_\rho = \{U_\rho^c, U_\rho^x, U_\rho^b, U_\rho^p\}$, $\rho = \overline{1, P}$ должен включать синтез следующих основных функций и алгоритмов их реализации (рис. 2.4) [17]:

- U_ρ^c – сбор и рассылка маршрутной информации по: охвату сети (глобальный – о состоянии всей сети или локальный – в пределах определенного количества ретрансляционных участков); типу (по мере необходимости, периодический или по событиям; пассивный и активный); объему (формату) маршрутных сообщений (зондов) – определяет количество контролируемых параметров сети; способу рас-

сылки (волновой, зондовый, табличный, гибридный); 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 Дейкстры), 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. 2.4. Синтезируемые функции методов маршрутизации в СРС

Кроме того, каждый класс методов маршрутизации требует разработки дополнительных алгоритмов. Например, иерархические методы требуют решения задач кластеризации и адресации, методы групповой маршрутизации – разработки алгоритмов построения и поддержания групповых маршрутов передачи информации, методы координатной маршрутизации – алгоритмов оперативного управления топологией [18] и т. д.

Синтез единого метода маршрутизации, осуществляющего пользовательскую и системную оптимизацию, удовлетворяющего всем условиям функционирования СРС и, соответственно, всем требованиям $\{TR_q\}$, $q = \overline{1, Q}$, не представляется возможным. Поэтому решение проблемы маршрутизации декомпозируется на задачи, т.е. разработку новых методов маршрутизации необходимо производить по классам, каждый из которых удовлетворяет определенному виду трафика, имеющемуся оборудованию в узлах или условиям функционирования СРС (рис. 2.5).

Методика оценки эффективности методов маршрутизации в автоматизированных сетях радиосвязи с динамической топологией предназначена для оценки эффективности методов маршрутизации, применяемых в сетях с динамической топологией.

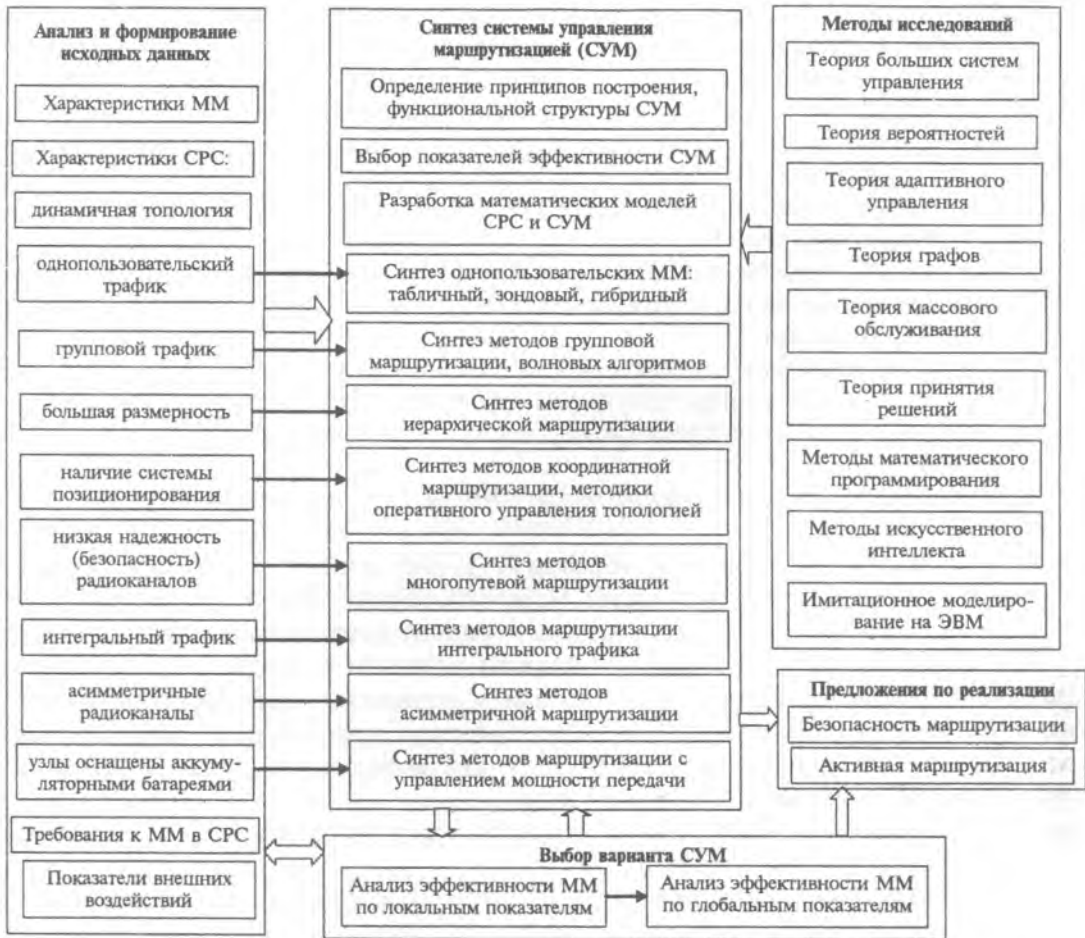


Рис. 2.5. Схема системного анализа и синтеза методов маршрутизации в СРС

Постановка задачи. *Заданы:*

- параметры СРС;
- множество ММ $\{U_\rho\}$, $\rho = \overline{1, P}$ предлагаемых для реализации в данной СРС;
- требования к методам маршрутизации в СРС $\{TR_q\}$, $q = \overline{1, Q}$.

Необходимо: оценить эффективность предложенных методов маршрутизации и дать рекомендации по их применению в самоорганизующихся радиосетях.

Методика оценки эффективности ММ в СРС с динамичной топологией включает следующие этапы.

1. Анализ функционирования СРС и задание исходных данных: параметров СРС; параметров множества исследуемых ММ; требований к методам маршрутизации.
2. Выбор показателей эффективности функционирования ММ.
3. Оценка локальных показателей эффективности ММ (временная, связанная и вычислительная сложность метода) по классам и выбор наиболее эффективного в своем классе (формирование допустимого множества ММ).
4. Построение модели функционирования СРС, моделей функционирования методов маршрутизации и проведение экспериментов.
5. Получение зависимостей показателей эффективности ММ от различных условий функционирования СРС.
6. Оценка эффективности ММ по глобальным показателям (пропускной способности, среднему времени задержки сообщений, соотношению объема служебной и полезной информации).

Рассмотрим подробнее содержание каждого из этапов.

В результате анализа предполагаемого применения сети и характеристик ее элементов должны быть получены следующие исходные данные.

1. *Параметры СРС:*

- размерность сети: N – число узлов сети, d – ее диаметр и площадь размещения;
- характеристики узлов сети, описанные на различных уровнях представления: физическом (частота f_i , вид модуляции, мощность передатчика p_i , параметры антенн и т. д.), канальном (тип протокола доступа к каналу; метод организации радиоканала – частотный, временной, кодовый; скорость передачи в канале v_k и т.д.); сетевом (исследуемый метод маршрутизации U_p , метод управления нагрузкой), транспортном; аппаратурном (объем буферов, характеристики процессора и т.п.); оперативном (соотношение количества узлов по величине мобильности, количество узлов и время их работы в режиме “молчания” и др.);
- характеристики радиоканалов: скорость передачи, соотношение симметричных и асимметричных каналов и др.;
- исходные варианты топологии СРС (исходные координаты размещения на местности – x_i, y_i , средняя степень связности узла сети – \bar{c}_i) и сценарии ее поведения: v – величина топологических изменений сети (скорость v_i и направления γ_i перемещения узлов, интенсивность отказов радиоканалов и узлов вследствие огневого или радиоэлектронного воздействия противника);

2. *Параметры информационного обмена в сети:*

- требования к качеству информационного обмена: $t_{\text{здоп}}$ – предельное значение времени задержки передачи сообщений ξ -го типа; $p_{\text{ош}}$ – вероятность ошибки в передаваемом сообщении;

– $\|g_{ij}^{\xi}(t)\|$ – значение входящей нагрузки между i -м и j -м абонентами ξ -го типа.

3. *Параметры исследуемого множества ММ:* $\{U_p\}$, $p = \overline{1, P}$.

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

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

- пропускная способность $S = V_{\text{дис}}/V_{\text{гис}}$, где $V_{\text{дис}}$ – объем (выраженный в битах) доставленных адресатам с заданным качеством $N_{\text{дис}}$ информационных сообщений, $V_{\text{гис}}$ ($N_{\text{гис}}$) – объем (количество) сгенерированных отправителями информационных сообщений или для сообщений, имеющих одинаковый объем $S = N_{\text{дис}}/N_{\text{гис}}$;

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

- эффективность использования служебных сообщений будем оценивать по соотношению $\delta = V_{\text{сс}}/V_{\text{дис}}$ ($N_{\text{сс}}/N_{\text{дис}}$), где $V_{\text{сс}}$ ($N_{\text{сс}}$) – объем (количество) служебных сообщений, переданных в сети (подсчитывается при каждой ретрансляции). Заметим, что к служебной информации относится не только служебные пакеты (маршрутные сообщения, зонды, квитанции, hello-сообщения, пакеты присутствия), 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 доставленных 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:

- $t_{\text{пм}}$ – время, необходимое для построения маршрута (временная сложность метода); данный параметр особенно важен для зондовых методов маршрутизации.

- $V_{\text{сс}}$ – количество (объем) служебных сообщений, используемых для построения маршрута (связная сложность метода);

- $V_{\text{мт}}$ – 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.

Для оценки эффективности ММ по локальным показателям необходимо: провести оценку i -го ММ по j -му ресурсу сети $R_i^j = \{R_i^1, R_i^2, R_i^3\}$, расходуемому на получение маршрутного решения при структурном изменении в сети, где $R_i^1 = t_{\text{пм}}$, $R_i^2 = V_{\text{сс}}$, $R_i^3 = V_{\text{мт}}$.

Модель сети: сеть представляется ненаправленным графом $G = (N, L)$, где N – число узлов; L – число каналов; d – ее диаметр. Допущения: каждый ММ принимает одинаковые маршрутные решения после произошедшего топологического изменения в сети, служебные сообщения передаются без ошибок, корректировка маршрутных таблиц происходит “синхронно”. Оценка эффективности ММ по локальным показателям проводится в следующей последовательности:

1) вычисление (доказательство) значений локальных показателей i -го ММ при топологическом изменении в сети – $R_i^1 = O(p(x))$, $R_i^2 = O(p(x))$, определение объемов маршрутных таблиц – $R_i^3 = O(p(x))$, где $p(x)$ – многочлен и $x = (N, L, d)$;

2) сравнение методов маршрутизации. Упорядочим локальные характеристики по приоритету $R^2 > R^1 > R^3$, который отражает отношения преимущества показателей, т.е. показатель R^1 важнее показателя R^2 . Критерием эффективности является следующее соотношение: если $R_i^j < R_k^j$ при одинаковых маршрутных решениях, то i -й ММ эффективнее k -го по j -му показателю.

Анализ локальных показателей, особенности реализации функций ММ позволяют обосновать преимущества того или иного ММ, выбрать ММ, удовлетворяющие требованиям, и тем самым сузить пространство поиска.

Для оценки эффективности ММ по глобальным показателям необходимо получить значения S , t_3 , δ , m_0 при различных условиях функционирования сети, которые могут задаваться варьируемыми значениями: N , v , g , \bar{c} . Получить аналитически данные зависимости не представляется возможным из-за нестационарности происходящих процессов и значительной размерности задачи. Поэтому следует прибегнуть к имитационному моделированию.

Выбор 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 v и g .

2.2. Методы однопользовательской маршрутизации информационных потоков в сетях с динамической топологией

Анализу и синтезу методов маршрутизации в сетях связи посвящено большое количество работ [1–12]. Однако большинство разработанных методов маршрутизации ориентировано на достижение оптимального использования сетевых ресурсов при квазистатических условиях работы сети, т.е. таких условиях, при которых сетевая топология и трафик изменяются медленно.

Задачей метода маршрутизации является создание, поддержание маршрутов передачи между каждой (передающей и принимающей) парой узлов по кратчайшим путям, где кратчайший путь определяется как функция минимальной стоимости пути, т.е. суммарной стоимостью всех каналов пути.

Все методы маршрутизации, применяемые в СРС, по способу построения и поддержания маршрутов можно разделить на три группы: таблично-ориентированные, зондовые и гибридные (рис. 2.6) [16].

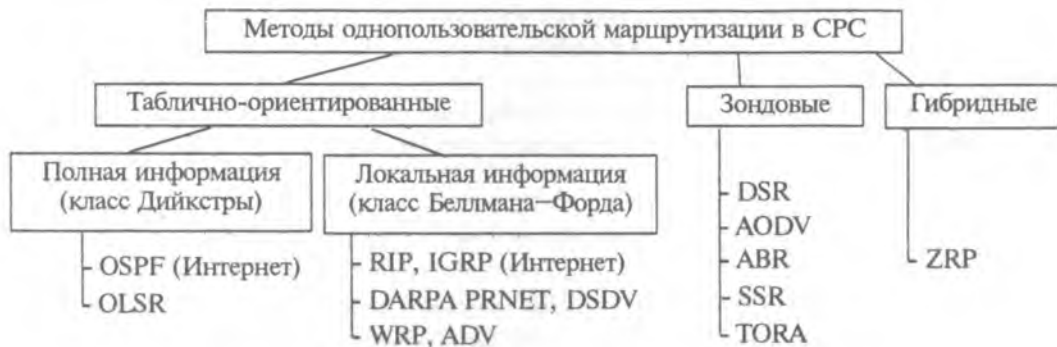


Рис. 2.6. Основные классы методов маршрутизации в СРС

2.2.1. Таблично-ориентированные методы маршрутизации

Для таблично-ориентированных методов маршрутизации известны два подхода для вычисления кратчайшего пути в сети в зависимости от того, какой информацией располагает узел о состоянии сети.

1. Каждый узел сети располагает полной информацией о состоянии сети. В этом случае каждый узел может выполнить любой централизованный алгоритм поиска кратчайшего пути. Так работает, например, сеть Интернет, в которой кратчайший путь вычисляется по алгоритму Дейкстры (протокол OSPF) [1, 2, 8]. Для СРС предложен метод OLSR (Optimized Link State Routing) [19], который является модификацией OSPF. Его основное отличие – учет широкополосной природы радиоканала для сокращения числа передач в алгоритме рассылки маршрутной информации.

2. Каждый узел сети располагает локальной информацией о состоянии сети. Данный класс методов реализован на основе распределенной версии алгоритма Беллмана-Форда [1, 2, 8] (метод вектора-расстояний DVA (Distance Vector Algorithms)), который изначально был реализован в сети ARPANET, а сегодня используется в Интернет в протоколах RIP и IGRP. Представителями данного класса методов в мобильных радиосетях являются DARPA PRNET (Packet Radio Networks) [13], DSDV (Destination Sequenced Distance Vector) [20], WRP (Wireless Routing Protocol) [21], ADV (Adaptive Distance Vector Routing) 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 метода маршрутизации сети DARPA PRNET [13]. 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. 2.7). Стоимость маршрута предполагает сумму метрик каждого канала. В качестве метрики обычно используется число ретрансляционных участков, но могут использоваться также задержка доставки пакетов, качество канала и др.

Каждый узел периодически информирует (рассылает маршрутные сообщения, содержащие измененные входы маршрутных таблиц) своих соседей о своих маршрутах к адресату. Приняв маршрутное сообщение, узел i модифицирует свои входы маршрутных таблиц, используя принцип оптимальности динамического программирования [8]:

$$C^{(p)}(i, j) = \min_k [c(i, k) + C^{(p-1)}(k, j)],$$

где $C^{(p)}(i, j)$ – стоимость кратчайшего пути от узла i к адресату j на p -й итерации; $c(i, k)$ – стоимость передачи по каналу (i, k) , $k \in N_i$. После корректировки маршрутных таблиц узел рассылает маршрутные сообщения своим соседям.

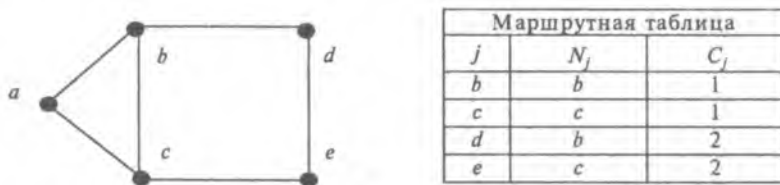


Рис. 2.7. Пример маршрутной таблицы для узла a (метод DARPA PRNET)

Недостатком данного метода является необходимость решения так называемой проблемы “конечного счета”. Алгоритм требует большего количества итераций для завершения работы (в худшем случае N итераций, где N – число узлов сети), вызывает заикливание маршрутов, в некоторых ситуациях генерирует большее количество маршрутных сообщений.

Метод DSDV [20] является таблично-ориентированным, основан на алгоритме Беллмана–Форда и улучшил его за счет исключения заикливания маршрутов. Каждый мобильный узел поддерживает маршрутную таблицу ко всем возможным адресатам сети. Каждый ее вход помечается порядковым номером, определенным адресатом (рис. 2.8). Порядковый номер маршрута n_m позволяет узлам различать “старый” маршрут и “новый” для избежания формирования маршрутных циклов [22]. Маршрутные таблицы периодически корректируются. Для уменьшения объема слу-

жебного трафика маршрутные сообщения бывают двух типов. Первый тип содержит полную маршрутную информацию узла и передается редко, второй — только измененную маршрутную информацию и может включаться в пакет канального доступа. При отказе канала маршруту, проходящему через него, назначается бесконечная метрика и корректируется его порядковый номер.

Идентификатор адресата j	Следующий узел на пути к адресату N_j	Число переприемов C_j	Порядковый номер маршрута n_m
----------------------------	---	-------------------------	---------------------------------

Рис. 2.8. Структура маршрутной таблицы (метод DSDV)

Все маршрутные сообщения нумеруются. Нумерация позволяет различать новую и старую информацию и гарантирует, что каждое маршрутное сообщение будет передаваться каждым узлом своим соседям не более одного раза.

Преимущество метода — отсутствие закливания маршрутов. Недостатки: трудность определения оптимального значения максимального “времени установки маршрута” для отдельного адресата, что приводит к колебаниям маршрута и дополнительной рассылке маршрутных сообщений; использование обоих способов рассылки маршрутных сообщений (периодического и событийного), что вызывает дополнительный служебный трафик; ожидание узлом для корректировки входа маршрутной таблицы к определенному адресату маршрутного сообщения от этого адресата; неподдержание групповой маршрутизации.

К сожалению, ни один из перечисленных подходов не отвечает сформулированным требованиям к методам маршрутизации в СРС с динамичной топологией. Подход с полной информацией для вычисления кратчайшего пути в сети требует большого количества информации о состоянии сети, которая надежно доставлялась бы каждому узлу от всех других узлов сети. Эта информация должна посылаться при каждом изменении сетевой топологии или стоимости канала. Задержка в доставке такой информации, особенно в СРС, а также дополнительная нагрузка на сеть служебными сообщениями значительны.

Алгоритм Беллмана—Форда требует решения проблемы “конечного счета”, вызывает закливание маршрутов в течение его выполнения (эта проблема решена в методе DSDV за счет введения нумерации маршрутов), требует N итераций (где N — число узлов в сети) для сходимости, в случае неправильного приема маршрутной информации приводит к возникновению блокировок. Если вычисляемое расстояние ограничено, то не обнаруживается разделение сети на отдельные подсети.

Поэтому был предложен таблично-ориентированный метод маршрутизации WRP для СРС с изменяющимся числом узлов, который обладает положительными свойствами распределенной версии алгоритма Беллмана—Форда и, кроме того, препятствует закливанию маршрутов, уменьшает время сходимости, обеспечивает несколько маршрутов доставки информации [21, 23].

Метод WRP предполагает, что каждый узел имеет свой идентификационный номер (ИН), каналы радиосвязи двунаправленные, в качестве стоимости пути выбран единственный параметр – число ретрансляций. Алгоритм, реализующий метод, сходится независимо от числа узлов и основан на ведении каждым узлом трех таблиц (U^x): маршрутной таблицы (MT), таблицы расстояний (ТР) и таблицы соседей (ТС).

В маршрутной таблице узла i (MT _{i}) хранится дерево, связывающее узел i со всеми узлами сети по кратчайшим путям. Будем называть его деревом источника T_i . Маршрутная таблица – размерности $N \times 4$, где N – число узлов сети. Элементами таблицы являются (рис. 2.9, в): j – узел адресат; N_j^i – следующий узел в кратчайшем пути от i к j ; A_j^i – промежуточный узел, непосредственно предшествующий j (расстояние до него от узла i равно $D_j^i - 1$); D_j^i – длина кратчайшего пути от узла i к j , выраженная числом ретрансляций; $F_j^i = \{0, 1\}$ – флаг, определяющий увеличение D_j^i ($F_j^i = 1$) со времени передачи i -м узлом последнего маршрутного сообщения.

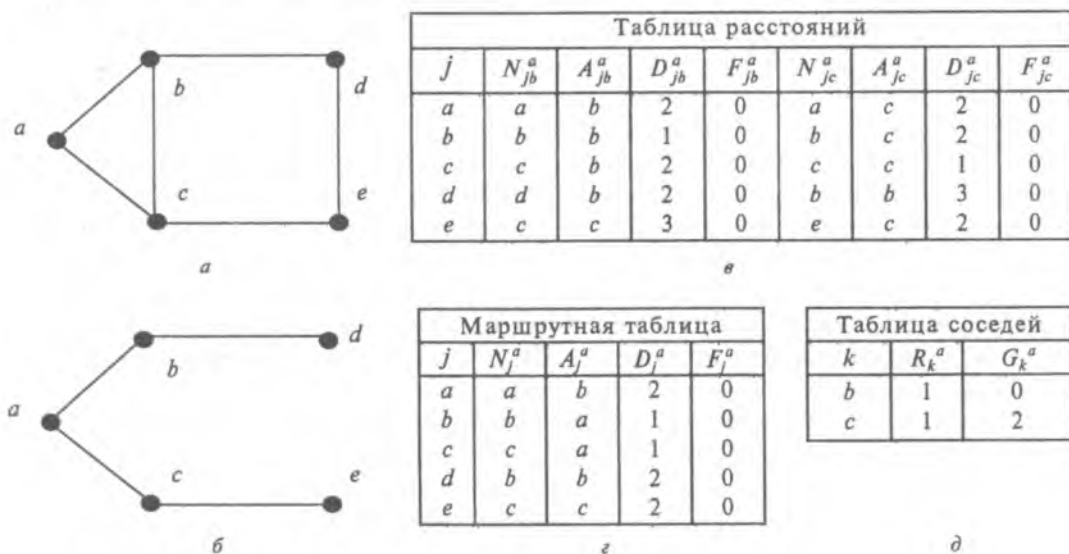


Рис. 2.9. Пример CPC и содержимое таблиц узла a

При инициализации маршрутная таблица узла i (рис. 2.9, з) содержит следующие значения: $A_i^i = N_i^i = i$, $D_i^i = 0$, $F_i^i = 0$.

Таблица расстояний узла i (рис. 2.9, в) содержит деревья источника, определяемые своими соседями. Ее размерность $|N| \times 4|N_i|$, где N_i – множество соседей

узла i . Элементы таблицы показаны на рис. 2.9, *в*: j — адресат; k — узел — сосед узла i ; N_{jk}^i — следующий узел в кратчайшем пути от k к j ; A_{jk}^i — узел, непосредственно предшествующий узлу j ; D_{jk}^i — кратчайшее расстояние от i к j через узел k ; $F_{jk}^i = \{0, 1\}$ — флаг, показывающий увеличение D_{jk}^i ($F_{jk}^i = 1$) с последним полученным маршрутным сообщением от узла k .

Маршрутные сообщения посылаются периодически (но асинхронно) каждым узлом через $t_{\text{пр}}$ единиц времени (период рассылки). Формат маршрутного сообщения i -го узла (МС $_i$): ИН $_j$, A_j^i , N_j^i , D_j^i для всех j в маршрутной таблице i -го узла.

Таблица соседей размерности $|N_i| \times 2$ (рис. 2.9, *д*) содержит такие элементы: k — соседний узел; $R_k^i = \{0, 1\}$ — флаг приема МС $_k$ ($R_k^i = 0$) после передачи ему МС $_i$; G_k^i — указатель качества связи с соседом, равный числу периодов рассылки маршрутного сообщения i -м узлом без подтверждения его приема k -м узлом.

На рис. 2.9, *а* показана СРС с пятью узлами. Предполагается, что все узлы связаны со своими соседями, узел a передал свое последнее маршрутное сообщение и не принял маршрутное сообщение от узла c . На рис. 2.9, *б* показано T_a .

Узлы СРС могут обнаруживать два типа топологических изменений: отсутствие радиосвязи со “старым” соседом и установление радиосвязи с “новым” соседом.

Отсутствие связи со своими соседями обнаруживается двумя способами: отсутствием информационного трафика данного соседа и маршрутного сообщения после периода обнаружения связности $t_{\text{пос}}$, равного нескольким $t_{\text{пр}}$ (для метода маршрутизации DARPA PRNET $t_{\text{пос}} = 4t_{\text{пр}} = 45$ с [13]); отсутствием квитанции на переданное сообщение в течение времени ее ожидания.

Узел устанавливает радиосвязность с новым узлом после приема его маршрутного сообщения. Передача информационных пакетов может осуществляться следующими способами (U^P).

1. *Последовательная маршрутизация.* Узел-отправитель ищет в маршрутной таблице следующий узел на пути к адресату и передает ему пакет; каждый узел в пути от источника к месту назначения выполняет аналогичные действия.

2. *Маршрутизация отправителем.* Узел-отправитель фиксирует в заголовке пакета ИН ретрансляторов маршрута “отправитель → адресат”. Преимущество данного способа: отсутствие заикливания при наличии радиосвязности между узлами, указанными в заголовке. При топологических изменениях, заставляющих изменить маршрут от источника к месту назначения, любой ретранслятор может определить новый маршрут к месту назначения или отправить пакет, используя последовательную маршрутизацию.

3. *Широковещательная передача или многопутевая маршрутизация.* Предполагается передача пакета всем или нескольким узлам сети.

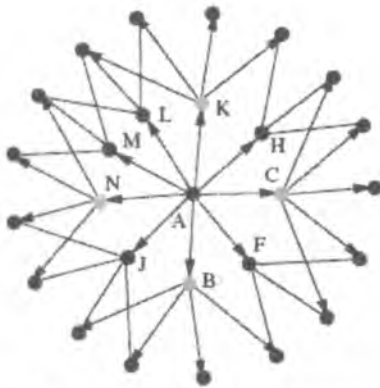


Рис. 2.10. Пример рассылки маршрутной информации для OLSR

узел выбирает подмножество соседей, покрывающих все узлы, находящиеся на расстоянии двух ретрансляций. Для примера на рис. 2.10 узел *A* может выбрать в качестве ретрансляторов маршрутной информации (в качестве MPR-узлов) узлы *B*, *C*, *K* и *N* (эти узлы покрывают все узлы, находящиеся от *A* на расстоянии двух ретрансляционных участков). Каждый узел вычисляет кратчайшие маршруты по критерию минимума ретрансляций на основании двух таблиц (топологической и таблицы соседей).

Преимущество данного метода: поддержание маршрутов в актуальном состоянии, меньший служебный трафик по сравнению с OSPF. Недостатком является все-таки значительный служебный трафик, который в общем случае может быть сопоставим с волновой рассылкой.

2.2.2. Оценка эффективности таблично-ориентированных методов маршрутизации

В табл. 2.1 показаны особенности построения, функционирования и потенциальные возможности каждого из рассматриваемых методов маршрутизации. В табл. 2.2 представлена сравнительная оценка таблично-ориентированных методов маршрутизации по локальным показателям. Анализ данной таблицы позволяет сделать следующие выводы.

Основным недостатком метода QLSR, основанного на алгоритме Дijkstra [8], является передача значительных объемов служебной информации $O(N)^*$ всем узлам сети при любом изменении топологии (стоимости канала) сети и значительная вычислительная сложность при увеличении размерности сети $O(N \times N)$.

Отличительной особенностью метода OLSR от применяемого в Интернете протокола OSPF (оба используют для поиска кратчайшего пути алгоритм Дijkstra) является уменьшение размеров и количества маршрутных сообщений, рассылаемых в сети. Для этого при проведении корректировки маршрутов каждый узел назначает определенное множество соседних узлов MPR-узлов (Multipoint Relays), ответственных за ретрансляцию служебных пакетов. Узел, не входящий в данное множество, не ретранслирует пакет. Для реализации данной процедуры каждый узел периодически передает соседям hello-сообщения, содержащие списки всех соседей. Из этого списка каждый

Таблица 2.1

Особенности построения и потенциальные возможности ММ	OLSR	DARPA PRNET	DSDV	WRP
Алгоритм вычисления кратчайшего пути	Дийкстры	Беллмана–Форда		
Маршрутная метрика	Ретрансляционный участок			
Частота рассылки маршрутных сообщений	Периодическая и по событиям			
Глубина рассылки маршрутных сообщений	Всеm	Только соседним узлам		
Порядковая нумерация маршрутов	Нет	Нет	Да	Нет
Применение в МТ информации об узле, предшествующем адресату	Нет	Нет	Нет	Да
Применение hello-пакетов	Да	Да	Да	Да
Возможность групповой маршрутизации	Нет	Нет	Нет	Да
Возможность иерархической маршрутизации	Да	Да	Нет	Да
Возможность многопутевой маршрутизации	Нет	Нет	Нет	Да
Возможность QoS-маршрутизации	Да	Нет	Да	Да
Возможность асимметричной маршрутизации	Нет	Да	Да	Да

Таблица 2.2

Метод маршрутизации Параметры	OLSR	DARPA PRNET	DSDV	WRP
Временная сложность $t_{\text{пм}}$ (отказ/появление канала)	$O(d)^*$	$O(d)$	$O(d)$	$O(h)$
Связная сложность $V_{\text{св}}$ (отказ/появление канала)	$O(N)^*$	$O(x = N)$	$O(x = N)$	$O(x = N)$
Число и размеры таблиц $V_{\text{мт}}$	1, $O(N \times N)$	2, $O(N \times N_i)$	2, $O(N \times N_i)$	3, $O(N \times N_i)$

Обозначения: N – число узлов сети, d – ее диаметр, h – вес маршрутного дерева, x – число узлов, на которых воздействует изменение топологии, N_i – число соседних узлов; * – при каждом топологическом изменении.

Таблично-ориентированные методы DARPA PRNET, DSDV, WRP являются представителями одного класса (Беллмана–Форда), и поэтому их временная и связная сложность одинакова для наихудшего случая – $O(d)$. WRP обладает лучшей временной сложностью $O(h) \leq O(d)$.

Метод WRP решает проблему сходимости за счет использования в маршрутных таблицах дополнительной информации об узле, предшествующем адресату. Однако он требует ведения трех маршрутных таблиц, хранение которых увеличивает объем памяти маршрутизаторов при увеличении размерности сети (что не критично в условиях современного развития уровня интегральных микросхем памяти). Таким образом, лучшие параметры среди таблично-ориентированных ММ имеет WRP.

Характерным недостатком названных таблично-ориентированных ММ является использование hello-пакетов, что приводит к увеличению служебной нагрузки и не позволяет обеспечить режим “молчания”.

2.2.3. Зондовые методы маршрутизации

Основное отличие зондовых методов маршрутизации от таблично-ориентированных методов в том, что узлы формируют маршрут передачи информации по мере необходимости путем рассылки по сети служебных пакетов малого объема (зондов-запросов) и сбора зондов-ответов, содержащих информацию о возможных маршрутах передачи информации. Поэтому зондовая маршрутизация предполагает два основных этапа функционирования: создание маршрута и его поддержание в актуальном состоянии. Представителями зондовых методов маршрутизации являются DSR (Dynamic Source Routing), AODV (Ad Hoc On-Demand Distance Vector), TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm), ABR (Associativity-Based Routing), SSR (Signal Stability Routing) [24–27] и др. Для зондовых методов маршрутизации характерны значительный служебный трафик и определенная инерционность в построении маршрутов.

Рассмотрим реализацию зондовых методов маршрутизации на примерах DSR и AODV, предложенных к стандартизации исследовательской группой IETF [14].

Метод DSR [24] предусматривает два этапа функционирования: создание и поддержание маршрута.

Создание маршрута. Отправитель (узел 1), не имея маршрута и желая передать пакет адресату (узлу 8), передает соседним узлам зонд-запрос, содержащий идентификатор адресата (рис. 2.11). Узел, приняв зонд-запрос, может поступить следующим образом. Если он не знает маршрута к адресату, то он добавляет свой идентификатор в зонд-запрос и передает его далее своим соседям (это позволит получить обратный путь передачи и избежать заикливания маршрута). В противном случае (или при достижении зондом-запросом адресата) отправителю посылается зонд-ответ с указанием маршрута. Узел-отправитель, получив зонд-ответ, помещает маршрут в свой кеш. Промежуточные узлы, передающие зонды-ответы, также сохраняют полученные маршруты к адресату и отправителю.

Поддержание маршрута. 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), узел k посылает зонд-отказ маршрута узлу i . Во втором случае любой узел может прослушивать наличие ретрансляций соседа и осуществлять пассивный контроль наличия маршрута на расстоянии одного ретрансляционного участка. При получении отправителем зонда-отказа он инициирует процесс создания нового маршрута.

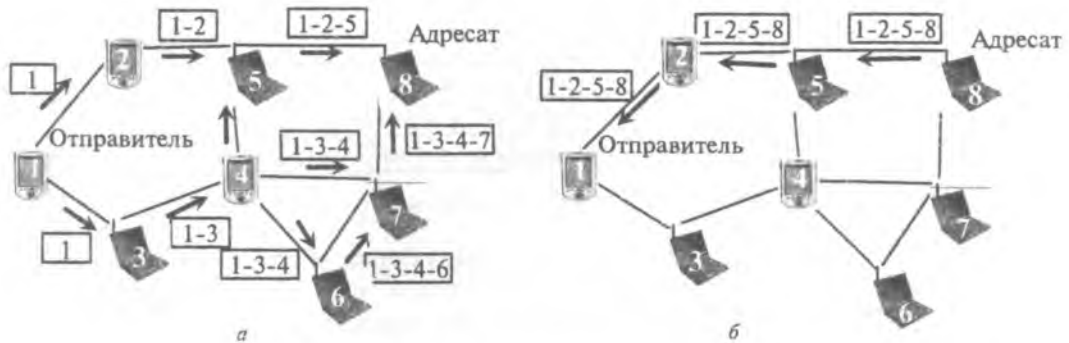


Рис. 2.11. Этап создания маршрута (метод DSR):
 а – рассылка зондов-запросов; б – передача зонда-ответа

Преимущества метода: быстрая адаптация к изменению топологии сети; отсутствие периодической передачи служебной информации. Недостаток: значительный объем служебной информации при увеличении размерности сети.

Метод AODV [25] представляет собой комбинацию методов DSR и DSDV. Построение и поддержание маршрутов осуществляется зондированием сети. Для поддержания информации о “новых” маршрутах используется порядковая нумерация маршрутов. Метод использует четыре типа сообщений: зонд-запрос, зонд-ответ, зонд-корректировку и hello-сообщение. Формат зондов показан на рис. 2.12 и 2.13 (в квадратных скобках указано число отведенных бит).

Тип сообщения [8]	Резервное поле [11]	Число ретрансляций [8]
Идентификатор ширококвещательной передачи [32]		
IP адресата [32]		
Порядковый номер адресата [32]		
IP отправителя [32]		
Порядковый номер отправителя [32]		

Рис. 2.12. Формат зонда-запроса (метод AODV)

Формат hello-пакета аналогичен формату зонда-ответа при изменении содержимого его полей: $L = 0$, “число ретрансляций” имеет значение нуля, в полях “IP адресата и его номер” записан свой собственный IP-адрес и номер и, кроме того, содержится список соседних узлов. Зонд-корректировка имеет поля, аналогичные зонду-ответу, кроме поля “число ретрансляций”, которое установлено в “бесконечность” и значение поля “порядковый номер адресата” увеличено на единицу.

Маршрутная таблица каждого узла содержит следующую информацию: IP адресата и его порядковый номер, число ретрансляций до адресата, следующий узел в пути к адресату, время функционирования маршрута, список активных соседей.

Тип сообщения [8]	$L = 1$	Резервное поле [11]	Число ретрансляций
IP адресата [32]			
Порядковый номер адресата [32]			
Время принятия зонда-запроса [32]			

Рис. 2.13. Формат зонда-ответа (метод AODV)

Функционирование метода происходит следующим образом. При необходимости передачи пакета узел обращается к маршрутной таблице за маршрутом. В случае его отсутствия передается зонд-запрос всем соседним узлам. Промежуточные узлы, приняв зонд-запрос и не имея маршрута к адресату, ретранслируют его далее. Адресат, получивший зонд-запрос, формирует зонд-ответ и посылает его отправителю. Отправитель, получив зонд-ответ, корректирует свою маршрутную таблицу.

Преимущества метода: обеспечение отсутствия закливания маршрутов, решение проблемы “конечного счета”, гарантирование получения новых маршрутов, поддержание групповой маршрутизации. Недостаток: использование hello-сообщений.

Метод TORA основан на преобразованиях направленных графов [28]. Суть метода заключается в построении (с помощью рассылки отправителем зондов-запросов и сбора зондов-ответов) и поддержании (обмен зондами-корректировки) правильной маршрутной сети (весавого направленного ациклического графа G_{o-a} с корнем в узле-отправителе и конечной вершиной в узле-адресате):

$$G_{o-a} = (H_i, K_{ij}), H_o > \dots > H_i > \dots > H_a,$$

где $K_{ij} = \downarrow$ ($K_{ij} = \uparrow$) – направление канала от узла i к узлу j “вниз” (“вверх”), определяемое соотношением весов соседних узлов ($j \in N_i$); H_o, H_i, H_a – веса узлов отправителя, i -го узла, адресата, соответственно.

За счет наличия нескольких маршрутов доставки сообщений отказ одного из них не приводит к необходимости перестройки всей маршрутной сети и тем самым значительно уменьшает объем служебного трафика. Метод выполняется узлом по мере необходимости и гарантирует отсутствие закливания маршрутов.

Хранение маршрутной информации $\{U^x\}$. В предлагаемом методе узел хранит “направление” передачи (следующий ретранслятор) для данного адресата (рис. 2.14). Каждый i -й узел сети относительно конкретного адресата имеет вес $H_i = (t_i, \beta_i, r_i, d_i, i)$, где t_i – время отказа канала; β_i – идентификатор узла, создающий относительный уровень в общей иерархии узлов; r_i – бит, разделяющий уровень на два подуровня и используемый для обнаружения разделения сети на отдельные подсети; d_i – целое число, используемое для упорядочивания узлов в общем уровне и служащее для распространения нового относительного уровня; i – уникальный идентификатор узла. Все идентификаторы узлов упорядочены с целью установле-

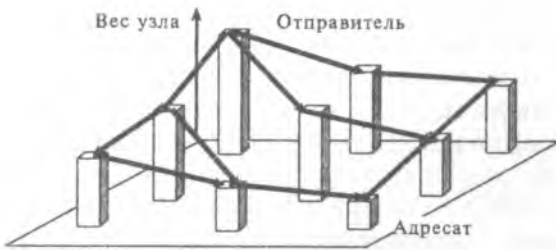


Рис. 2.14. Концептуальная иллюстрация весовой маршрутной сети

ния приоритета и исключения конфликтной ситуации ($a < b < c < \dots < z$ или $1 < 2 < 3 < \dots < 100$). Первые три значения t_i, β_i, r_i определяют новый относительный уровень узла.

Изначально вес каждого узла сети не определен: $H_i = (-, -, -, i)$. В дальнейшем веса узлов будут модифицироваться. Вес адресата, например F , сначала равен

нулю — $H_F = (0, 0, 0, 0, F)$. Кроме того, каждый узел хранит вес своих соседних узлов $j \in N_i$ ($HN_{ij} = (-, -, -, j)$ для каждого j) и состояния каналов. Каждый канал $K_{ij} \in L$ может находиться в одном из трех состояний:

- не направлен ($K_{ij} = -$), если вес узла j не определен;
- направлен от узла i к узлу j (если $(H_i > H_j)$ или H_i — определен, а H_j — не определен) — канал “вниз” ($K_{ij} = \downarrow$) относительно узла i ,
- направлен от узла j к узлу i ($(H_i < H_j)$) — канал “вверх” ($K_{ij} = \uparrow$) относительно узла i .

Функционирование TORA включает три основных этапа: создание маршрута передачи информации, его поддержание (оптимизация) и уничтожение.

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

Метод SSR выбирает маршрут, используя временной и энергетический параметры: продолжительность существования канала и мощность сигнала. Каждый узел содержит сигнальную и маршрутную таблицы. Преимущество: 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.

2.2.4. Оценка эффективности зондовых методов маршрутизации

В табл. 2.3 показаны особенности построения, функционирования и потенциальные возможности зондовых методов маршрутизации.

Основные характеристики зондовых методов маршрутизации представлены в табл. 2.4. Временная и связная сложность зондовых ММ: на этапе инициализации

одинакова для всех методов; на этапе отказа – лучшие параметры TORA. Методы маршрутизации AODV и DSR схожи, хотя у них есть существенные различия. Наибольшее отличие – в формате зондов, передаваемых при построении маршрутов. Если в методе DSR зонд несет полную информацию о маршруте (с ростом размера сети увеличивается объем служебной информации), то в методе AODV информацию дает только идентификатор адресата и отправителя. Метод DSR хранит полную информацию о маршрутах, а метод AODV – только о ближайших ретрансляторах. Метод AODV не может использовать асимметричные каналы, а метод DSR может функционировать в этих условиях.

Таблица 2.3

Метод	AODV	DSR	SSR	ABR	TORA
Характеристика					
Маршрутная метрика	Кратчайший и “новый” маршрут	Кратчайший маршрут	Стабильный и качественный маршрут	Стабильный и кратчайший маршрут	Кратчайший маршрут
Способы поддержания маршрутов	Стирание маршрута, извещение отправителя			Локализация зондов-запросов	Изменение направлений каналов
Пакеты “присутствия”	Да	Нет	Да	Да	Нет
Групповая маршрутизация	Да	Нет	Нет	Нет	Да
Многопутевая маршрутизация	Нет	Да	Нет	Нет	Да
Иерархическая маршрутизация	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Асимметричная маршрутизация	Нет	Да	Нет	Нет	Да
QoS-маршрутизация	Нет	Да	Нет	Нет	Да

Метод DSR предназначен для использования в сетях малой размерности и незначительной скоростью перемещения узлов. Его преимущества – отсутствие сигналов присутствия (следовательно, дополнительная служебная информация не вносится), наличие и хранение маршрутов к адресату в кеше. Однако в отличие от других зондовых методов в DSR фактически отсутствует этап поддержания маршрута (в случае отказа канала в первичном маршруте снова начинается этап построения маршрута).

В методе ABR выбирается маршрут с наибольшим временем существования (подсчет сигналов присутствия). Недостатки метода: каждый узел должен передавать сигнал присутствия, выбираются не кратчайшие маршруты.

Метод маршрутизации SSR представляет собой разновидность ABR. Он выбирает наиболее стабильные и качественные (по уровню сигнала) каналы. Недостатки

метода аналогичны недостаткам ABR. Кроме того, время задержки при построении маршрута значительно.

Таблица 2.4

Характеристика \ Метод	AODV	DSR	ABR	SSR	TORA
Временная сложность: $t_{пр}$ – построение маршрута, его поддержание (отказ канала)	$O(2d)$ $O(2d)$	$O(2d)$ $O(2d)$	$O(d+z)$ $O(l+z)$	$O(d+z)$ $O(l+z)$	$O(2d)$ $O(2d)$
Связная сложность N_{cc} : построение маршрута, его поддержание (отказ канала)	$O(2N)$ $O(2N)$	$O(2N)$ $O(2N)$	$O(N+y)$ $O(x+y)$	$O(N+y)$ $O(x+y)$	$O(2N)$ $O(2x)$
Число и объем МТ: V_{MT}	1, $O(N \times N)$	$O(N \times d)$ кеш	1, $O(N \times N)$	2, $O(N \times N)$	1, $O(N \times N)$
Защипливание маршрутов	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет

Обозначения: l – диаметр фрагмента сети, участвующего в построении маршрута; y – общее число узлов в направленном пути при передаче зонда-запроса; z – диаметр направленного пути при передаче зонда-запроса; x – число узлов, на которых воздействует изменение топологии.

Преимущества TORA: получение нескольких маршрутов к адресату, обеспечение режима “молчания”, минимизация реакции на топологические изменения в сети.

Однако зондовые методы обладают инерционностью в построении маршрута, вызывают значительный служебный трафик при увеличении числа пар отправитель–адресат. Для минимизации объема служебного трафика, уменьшения времени построения маршрута зондовыми методами предложены следующие способы [29]:

- 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 [14].

Общая сравнительная характеристика зондовых и табличных методов представлена в табл. 2.5.

Некоторые результаты имитационного моделирования методов маршрутизации (WRP, TORA, AODV, DSR, волнового) представлены на рис. 2.15–2.17 [30–34].

На рис 2.15 представлены зависимости пропускной способности, среднего времени задержки передачи сообщений и отношения $N_{cc}/N_{дис}$ от величины мобильно-

сти узлов сети при фиксированной входной нагрузке $g = 10$ п/с. Увеличение уровня мобильности узлов приводит к уменьшению пропускной способности сети, увеличению времени доставки сообщений и увеличению объема служебного трафика $V_{ст}$.

При небольшой величине мобильности узлов большую пропускную способность имеет табличный метод (отсутствует задержка в построении маршрута). С возрастанием величины изменений топологии сети табличный метод быстрее увеличивает $V_{ст}$ по сравнению с зондовым, поэтому при $v > v_H$ пропускная способность $S_{ЗММ}$ больше $S_{ТОММ}$. Максимальное значение S при высокой динамике топологии имеет TORA (наличие нескольких маршрутов передачи, минимизация зоны рассылки зондов). При достижении значения v_b объем служебной информации становится значительным, и при $v > v_b$ эффективен волновой метод маршрутизации.

Таблица 2.5

Методы маршрутизации	Зондовые	Таблично-ориентированные
Характеристика		
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 (+)

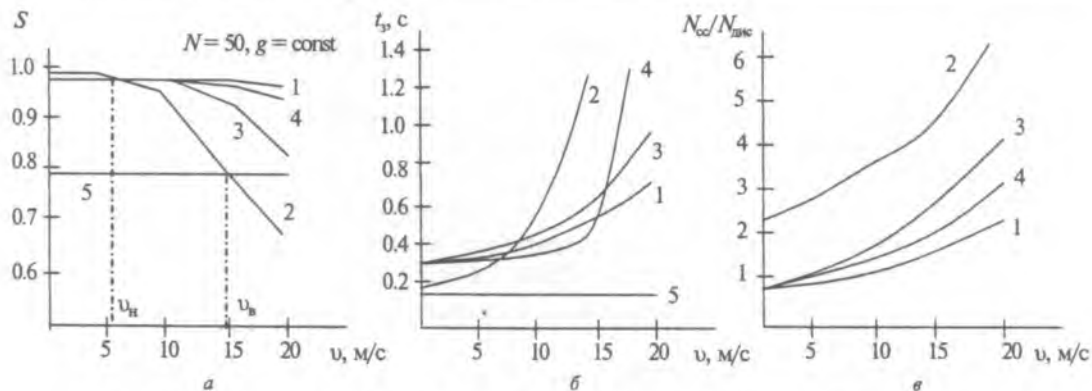


Рис. 2.15. Зависимости S , t_3 , $N_{cc}/N_{диск}$ от величины мобильности узлов для методов: 1 – TORA, 2 – WRP, 3 – AODV, 4 – DSR, 5 – волновой

При незначительной мобильности узлов задержка передачи сообщений меньше для WRP (постоянно поддерживает маршруты передачи), большее значение у зондовых методов маршрутизации (рис. 2.15, б), так как они обладают начальной инерционностью получения маршрута вследствие реализации процесса рассылки зондов-запросов и сбора зондов-ответов. С ростом мобильности узлов большее значение t_3 у WRP, среди зондовых методов – у AODV.

Объем служебной информации с ростом мобильности увеличивается для всех методов (рис. 2.15, в). При малом уровне мобильности табличный метод генерирует значительно больший служебный трафик по сравнению с зондовыми методами из-за периодического и событийного обмена маршрутными сообщениями. С ростом динамики топологии среди зондовых методов сильнее увеличивает служебный трафик метод AODV (из-за увеличения hello-сообщений), меньше – DSR (из-за обучения маршрутам).

На рис. 2.16 представлены зависимости S , t_3 , $N_{cc}/N_{диск}$ от изменения входной нагрузки на узел при фиксированной скорости перемещения узлов сети $v = 10$ м/с. Наибольшую зависимость от роста нагрузки в сети демонстрируют зондовые методы маршрутизации. При увеличении нагрузки в сети до $g_{гр}$ зондовые методы обладают большей пропускной способностью, табличные – меньшим временем задержки передачи сообщений по сравнению с зондовыми ММ вследствие рассылки меньшего объема служебной информации и постоянного наличия маршрутов передачи информации. При $g > g_{гр}$ предпочтителен табличный метод.

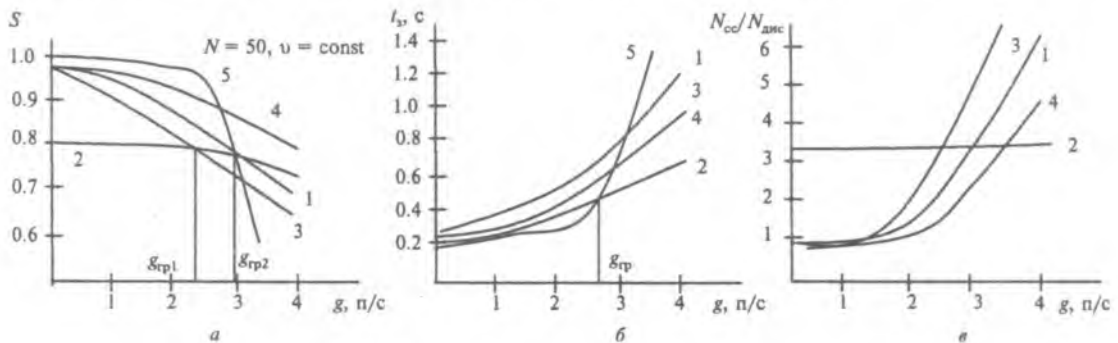


Рис. 2.16. Зависимости S , t_3 , $N_{cc}/N_{диск}$ от входящей нагрузки для методов: 1 – TORA, 2 – WRP, 3 – AODV, 4 – DSR, 5 – волновой

Оптимальность длин m_0 получаемых маршрутов исследуемых ММ изображена на рис. 2.17. Значение m_0 не превышает единицы, т.е. все методы маршрутизации строят маршруты, близкие к кратчайшим (оптимальным). С ростом мобильности узлов оптимальность маршрутов для каждого метода остается практически неизменной. Маршруты большей длины строит метод TORA, наименьшей – WRP

(вследствие специфики построения маршрутов). С ростом входной нагрузки в сети зондовые методы значительно увеличивают служебный трафик и из-за возникающих перегрузок значение m_0 наихудшее у AODV (TORA имеет несколько маршрутов передачи и менее склонен к перегрузкам в сети), наилучшее – у табличного метода.

Из зависимостей, представленных на рис. 2.15–2.17, можно сделать вывод, что для достижения максимальной пропускной способности сети необходимо применять совокупность методов маршрутизации:

- при малых изменениях топологии сети $v(N) < v_H(N)$ (где N – число узлов сети, $v_H(N)$ – нижняя граница применения зондового метода) лучше табличные методы маршрутизации;
- при значительных изменениях топологии сети ($v_H(N) < v(N) < v_B(N)$, $v_B(N)$ – верхняя граница применения зондовых ММ) предпочтительны зондовые методы;
- при высокой степени динамики топологии $v(N) > v_B(N)$ необходимо использовать волновой метод маршрутизации;
- с увеличением нагрузки в сети (числа пар отправитель–адресат) необходимо применять таблично-ориентированные ММ.

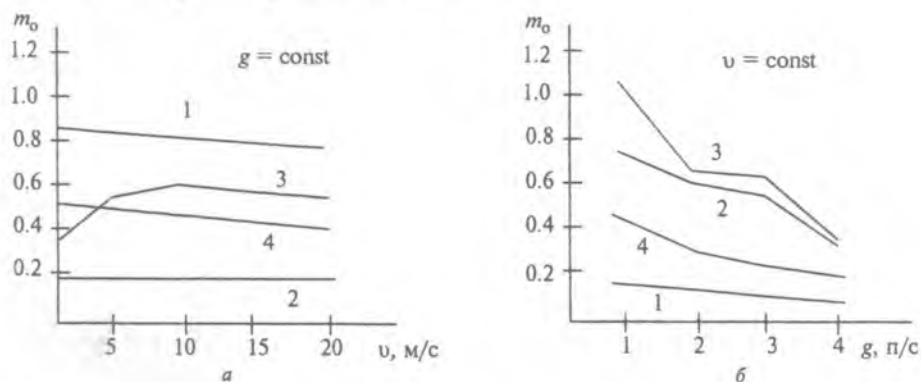


Рис. 2.17. Зависимость m_0 от изменения мобильности узлов и уровня входящей нагрузки для методов: 1 – TORA, 2 – WRP, 3 – AODV, 4 – DSR, 5 – волновой

2.2.5. Гибридный метод маршрутизации

Проведенные исследования показали [30–34], что таблично-ориентированные методы маршрутизации эффективны при незначительной динамике сетевой топологии, зондовые – при среднем и высоком значениях изменения топологии ($v_H < v < v_B$, где v_H , v_B – верхняя и нижняя границы применения зондовых методов маршрутизации), волновые – при очень высокой динамике, т.е. ситуации, при которой невозможно отследить изменения топологии сети (рис. 2.18).

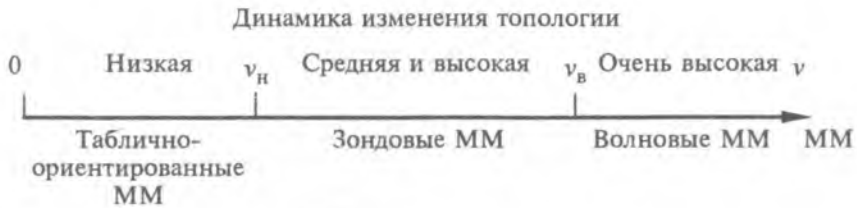


Рис. 2.18. Границы эффективного применения различных методов маршрутизации

Для достижения эффективного функционирования СРС в зависимости от динамики сетевой топологии предложен гибридный метод маршрутизации ZRP (Zone Routing Protocol) [35]. Он позволяет осуществить адаптацию к динамике изменения топологии сети, т.е. осуществлять переход от таблично-ориентированных методов к зондовым, и наоборот.

Суть метода ZRP. Каждый i -й узел сети хранит маршрутную информацию о соседних узлах на расстоянии R -ретрансляционных участков (так называемой маршрутной зоны $R_{MЗ}$) согласно правилам функционирования табличных методов маршрутизации. Более точно, маршрутная зона узла $M_{zi}(R) = \{j | d(i, j) \leq R\}$ – это множество узлов j , находящихся от i на расстоянии $d(i, j)$, выраженном числом ретрансляционных участков, меньшем или равном R .

Иллюстрация маршрутных зон для узлов 10 и 23 со значением $R_{MЗ} = 2$ представлена на рис. 2.19. Узлы 3, 5, 12, 14, 16, 19 являются периферийными для узла 10, а узлы 6, 19, 22 – для узла 23.

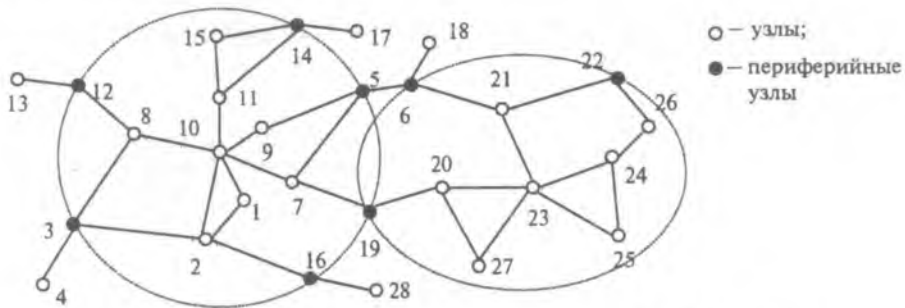


Рис. 2.19. Маршрутные зоны для узлов 10 и 23 ($R_{MЗ} = 2$)

Построение и поддержание маршрутов к адресатам, находящимся внутри зоны, осуществляется таблично-ориентированным ММ (периодическая корректировка маршрутных таблиц), за пределами – зондовым методом (рассылка зондов-запросов и сбор зондов-ответов). Для уменьшения служебного трафика в предлагаемом методе (в отличие от волнового характера распространения зондов при зондовой маршрутизации) реализована локальная рассылка зондов-запросов по так называемому

зональному дереву (корень в данном узле, а конечными вершинами являются периферийные узлы). Архитектура гибридного метода маршрутизации представлена на рис. 2.20.



Рис. 2.20. Архитектура гибридного метода маршрутизации

Маршрутная зона $R_{МЗ} = f(v, N)$ адаптируется к динамике сетевой топологии (больше v – меньше значение $R_{МЗ}$, и наоборот). При значении $R_{МЗ} = 0$ предложенный метод будет функционировать как зондовый метод маршрутизации, при $R_{МЗ} = d$ (где d – диаметр сети) – как таблично-ориентированный. Общий служебный трафик $V_{СТ}$ будет складываться из внутризонального $V_{ВТ}$ (рассылка маршрутных сообщений) и межзонального $V_{МТ}$ (процесс рассылки зондов-запросов и сбора зондов-ответов) трафиков.

В процессе функционирования сети каждый узел может оценить соотношение объемов внутризонального и межзонального трафика $V_{ВТ}/V_{МТ}$ и осуществить адаптацию в виде изменения зоны (рис. 2.21, а).



Рис. 2.21. Оптимизация радиуса маршрутной зоны

Первоначальное значение размеров зоны каждого узла может устанавливаться центром управления сетью на этапе планирования сети с учетом прогнозируемого характера ее функционирования. В дальнейшем каждый узел будет стремиться ми-

минимизировать служебный трафик, т.е. оптимизировать значение размера зоны $R_{мз}^*$, используя следующие основные стратегии (рис. 2.21, б):

- при увеличении (уменьшении) доли внутризонального трафика $V_{вт}$ ($V_{вт} = \text{const}$) узел стремится уменьшить размеры зоны $R_{мз} = R_{мз} - 1$ ($R_{мз} = R_{мз} + 1$);
- при увеличении (уменьшении) доли межзонального трафика $V_{вт}$ ($V_{вт} = \text{const}$) узел стремится увеличить (уменьшить) размеры зоны $R_{мз} = R_{мз} + 1$ ($R_{мз} = R_{мз} - 1$).

Внутризональная маршрутизация. Процесс построения зоны базируется на знании узлом своих соседей. Узел устанавливает радиосвязность со своим соседним узлом путем обмена с ним hello-сообщениями, используя один из протоколов канального уровня. Процесс сбора, корректировки маршрутной информации в $R_{мз}$ может осуществляться согласно таблично-ориентированному методу маршрутизации. Отличительными особенностями предложенного метода являются ограничение глубины рассылки маршрутных сообщений (ограниченное значение $h_p = R - 1$) и выделение периферийных узлов зоны. Рассылка маршрутных сообщений (периодическая и событийная) позволяет каждому узлу сформировать маршрутные таблицы, хранящие информацию об узлах своей маршрутной зоны с выделенными периферийными узлами. Так как корректировка маршрутных таблиц осуществляется локально (в пределах $R_{мз}$), то объем внутризонального служебного трафика $V_{вт} = f(R_{мз}, v_{мз})$ зависит от размера зоны и интенсивности изменения топологии внутри зоны и не зависит от размерности сети.

Межзональная маршрутизация. Процесс построения маршрутов за пределами $R_{мз}$ осуществляется согласно правилам функционирования зондовых методов маршрутизации. При распространении зондов-запросов возможно возникновение трех ситуаций: завершение рассылки зондов-запросов при достижении границы сети или его возвращении к отправителю и маршрут найден.

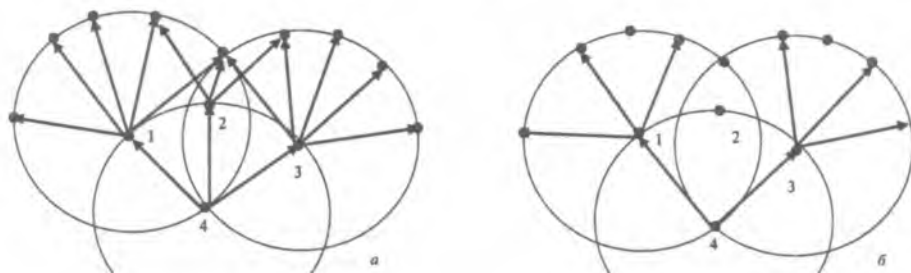


Рис. 2.22. Процесс рассылки зондов-запросов:
 а – полная рассылка зондов-запросов; б – селективная рассылка зондов-запросов

Для сокращения служебного трафика при рассылке зондов-запросов предлагаются следующие правила.

1. Рассылка зондов-запросов осуществляется только по зонному дереву (узел рассылает зонд-запрос через периферийные узлы).
2. Пассивный анализ передач зондов-запросов выполняется узлами зоны не принадлежащими зонному дереву рассылки.
3. Селективный выбор периферийных узлов осуществляется для организации необходимого “направления передачи” зондов-запросов. Концептуально данный механизм представлен на рис. 2.22. Узел 4 посылает зонды-запросы периферийным узлам 1 и 3.

2.3. Методы групповой маршрутизации

Все существующие методы маршрутизации по количеству получателей информации можно классифицировать как однопользовательские, групповые и волновые. Однако условия функционирования СРС могут предполагать рассылку информации определенной группе пользователей (например, командир—подчиненные). В качестве многоадресной информации могут выступать групповые аудио/видеоконференции, совместная работа групповых приложений, распространение различной информации (боевых приказов, телеметрия и т.д.). Групповая маршрутизация (построение и поддержание маршрутов передачи информации типа “один-ко-многим” и “многие-ко-многим”) играет важную роль в информационном обмене, и разработка данных методов маршрутизации является актуальной задачей. Поэтому для эффективного использования сетевых ресурсов необходимо решить задачу групповой маршрутизации (multicasting), предполагающую построение и поддержание маршрутов передачи информации типа “один-ко-многим” или “многие-ко-многим”.

2.3.1. Анализ методов групповой маршрутизации

К методам групповой маршрутизации предъявляются следующие основные требования $\{TR_q^r\}$: минимальная загрузка сети служебной информацией, надежность построения и поддержания маршрутов (желательно наличие нескольких маршрутов доставки информации), обеспечение своевременного обновления маршрутов передачи, совместимость с однопользовательской маршрутизацией.

Методы групповой маршрутизации, используемые в сети Интернет: DVMRP (Distance Vector Multicast Routing Protocol), MOSPF (Multicast Open Shortest Path First), СBT (Core Based Trees), PIM (Protocol Independent Multicast) [1, 3] — не могут быть применены в СРС вследствие высокой динамики ее топологии (необходимо осуществлять частое реформирование групповых маршрутов). Кроме того, для построения групповых маршрутов (ГМ) передачи данные методы предполагают знание глобальной информации о состоянии сети, что в условиях СРС приведет к значительному служебному трафику.

В последние несколько лет предложен ряд методов групповой маршрутизации (МГМ), предназначенных для использования в мобильных радиосетях [3]: AMRIS

(Ad-hoc Multicast Routing Protocol) [37], MAODV (Multicast Ad-hoc On-demand Distance Vector Routing) [38], AMRoute (Ad-hoc Multicast Routing) [39], ODMRP (On-Demand Multicast Routing Protocol) [40], CAMP (Core-Assisted Mesh Protocol) [41], NSMP (Neighbor Supporting Ad Hoc Multicast Routing Protocol) [42] и др. Данные МГМ можно классифицировать по следующим признакам (рис. 2.23): критерию выбора маршрута, структуре ГМ, способам их построения и поддержания, степени зависимости от однопользовательской маршрутизации.

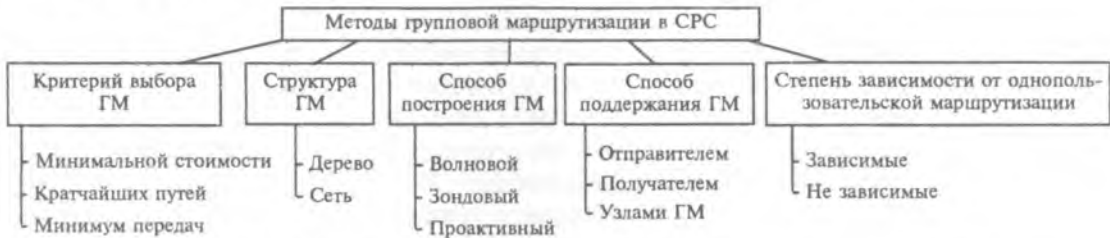


Рис. 2.23. Классификация методов групповой маршрутизации в СРС

Математическая постановка задачи. Сеть представляется в виде графа $G = (V, E)$, где V – множество узлов, E – множество каналов, известны “стоимости” передачи информации по каналам $c: e \rightarrow R^+, e \in \overline{1, E}$.

Необходимо найти связный подграф $G^r = (V^r, E^r)$, $V^r \subseteq V$, $E^r \subseteq E$, $V^r = \{s, r, f\}$ – множество отправителей $\{s\}$ и получателей $\{r\}$ одной группы, множество узлов $\{f\}$, ответственных за распространение групповой информации; E^r – множество каналов или групповых маршрутов удовлетворяющий одному из следующих условий.

1. Минимальная стоимость G^r , определяемая как $C(G^r) = \min_{e \in E^r} \sum c(e)$. В теории графов данная задача интерпретируется как задача нахождения

дерева Штейнера [43]. Эта задача относится к классу NP -полных и к настоящему времени не известны эффективные алгоритмы ее решения. Кроме того, она требует знания всей информации о состоянии сети (что проблематично в СРС) и поэтому не может использоваться в СРС в реальном масштабе времени для нахождения маршрутов.

2. Нахождение дерева кратчайших маршрутов (что эквивалентно минимизации задержки в передаче сообщений – $\min t_d$). Обозначим $m(v_1, v_k)$ – путь от узла v_1 к узлу v_k , представляющий последовательность узлов v_1, v_2, \dots, v_k , таких, что $(v_i, v_{i+1}) \in E^r$ для $1 \leq i \leq k-1$. Стоимость маршрута определяется суммой стоимостей каналов:

$$C(m(v_1, v_k)) = \sum_{e \in m(v_1, v_k)} c(e).$$

Тогда дерево кратчайших маршрутов должно удовлетворять следующему условию: $C(G^r) = \min \sum_{m=1}^M C(m(v_p, v_j))$, где $i \in s, j \in r, m \in M$ – множество возможных маршрутов. Большинство МГМ используют данный критерий при выборе маршрутов.

3. Минимизация множества передающих узлов $\{f\}$: $C(G^r) = \min |f|$. Данный критерий выбора ГМ характерен при волновой рассылке информации с целью минимизации числа передач узлов.

Структура групповых маршрутов может быть в виде *дерева* или *сети*. Так как в сети может быть несколько источников информации для определенной группы пользователей, то конструирование группового дерева (ГД) возможно двумя способами. При первом способе каждый источник групповой информации инициирует построение оптимального ГД с каждым получателем (МГМ DVMRP, MOSPF для сети Интернет). Данный способ неприемлем для СРС вследствие возможного быстрого перемещения узла-источника. Поэтому применяется второй способ, согласно которому генерируется единственное ГД (рис. 2.24, а) между множествами отправителей и получателей групповой информации (методы СВТ, PIM – в Интернете, методы AMRoute, AMRIS, MAODV – в мобильных радиосетях).

Групповые методы маршрутизации, генерирующие маршрутные деревья, более эффективны с точки зрения минимизации задержки в передаче сообщений. Однако отсутствие альтернативных маршрутов передачи приводит к частым перестройкам деревьев в условиях высокой динамики топологии сети. Кроме того, весь групповой трафик направляется по одному и тому же пути, что может привести к перегрузке ГМ.

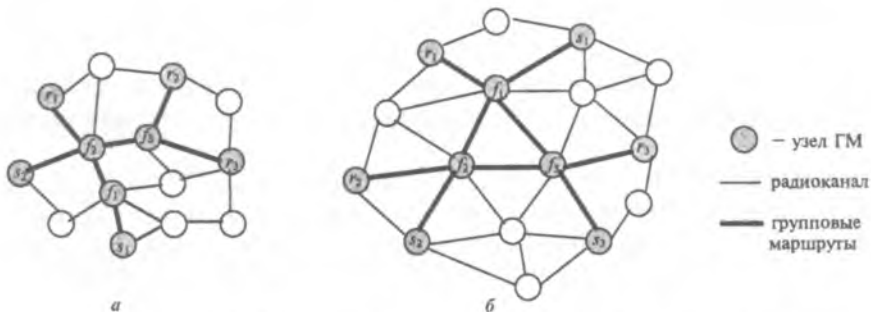


Рис. 2.24. Структура групповых маршрутов: а – дерево; б – сеть

Методы ODMRP и CAMP основаны на построении сетевой структуры групповых маршрутов передачи, соединяющей группу пользователей. Пример ГМ в виде сети изображен на рис. 2.24, б. Узлы $s = \{s_1, s_2, s_3\}$ являются узлами-отправителями, а узлы $r = \{r_1, r_2, r_3\}$ – получателями информации. Узлы $f = \{f_1, f_2, f_3\}$ поддерживают кратчайшие маршруты между любой парой в виде подсети. Отказ одного из группо-

вых маршрутов не приводит к необходимости перестройки всей подсети, что значительно снижает служебный трафик по сравнению с групповой маршрутизацией на основе дерева-источника. Так, например, при отказе канала f_1-f_2 доставка информации может осуществляться по маршруту $f_1-f_3-f_2$.

Недостаток сетевой структуры ГМ: увеличение (в сравнении с ГМ в виде дерева) служебного трафика и, как следствие, рост вероятности столкновений пакетов и увеличение задержки передачи сообщений.

По способу построения групповых маршрутов МГМ могут быть классифицированы на волновые, зондовые и таблично-ориентированные (проактивные).

Волновой способ передачи групповой информации является самым простым и предполагает рассылку пакетов всем узлам сети. При получении группового пакета узел проверяет, принимал ли он его ранее. Если принимал, то пакет стирается, иначе — узел рассылает пакет всем своим соседям. Волновой способ передачи приводит к значительному росту трафика в сети, поэтому для минимизации общего числа передач в п. 2.4 рассмотрен ряд волновых алгоритмов.

Построение групповых маршрутов передачи информации заключается в назначении в сети множества узлов $\{f\}$, которые отвечают за распространение групповой информации от множества узлов-отправителей $\{s\}$ множеству узлов-получателей $\{r\}$. Большинство МГМ реализуют зондовый способ построения ГМ (ODMRP, AMRIS, AMRoute, MAODV). Данный способ заключается в широковещательной рассылке в сети групповых зондов-запросов (ГЗЗ) и сбора групповых зондов-ответов (ГЗО) (рис. 2.25). При необходимости узлу-отправителю s передать информацию группе узлов $\{r\}$ (и не имея уже сформированного ГМ) он широковещательно передает соседним узлам ГЗЗ (метод ODMRP).

При приеме узлом i ГЗЗ его обработка осуществляется следующим образом.

1. Если данный зонд был принят ранее, то он стирается, иначе — узел заносит информацию о нем в кеш и корректирует входы однопользовательской маршрутной таблицы.

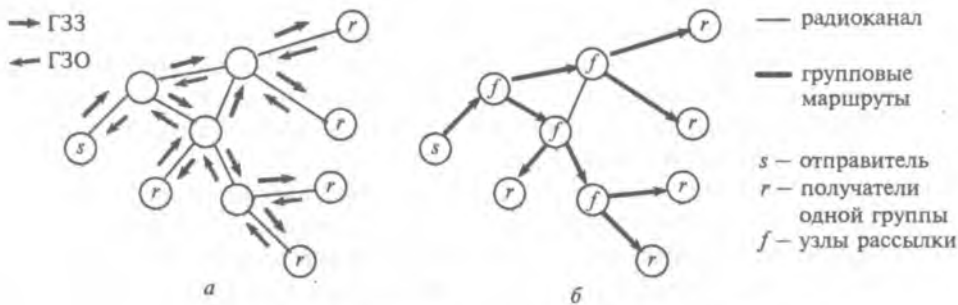


Рис. 2.25. Процесс формирования ГМ зондовым методом:
а — зондирование сети; б — сформированные ГМ

2. Если $i \notin r$, то зонд широковещательно передается далее.

3. Если $i \in r$, то зонд формирует групповую маршрутную таблицу, групповой зонд-ответ и передает его соседним узлам. ГЗО распространяется до тех пор, пока не достигнет узлов-отправителей. В процессе обработки ГЗО будет сформировано множество $\{f\}$ узлов, отвечающих за распространение информации по групповым маршрутам.

Построение ГМ-передачи методом AMRIS также осуществляется зондированием. Данный метод не требует функционирования однопользовательской маршрутизации и формирует ГД в виде весового направленного ациклического графа с помощью назначения идентификационных номеров групповой передачи (*msd-id*) каждой группе пользователей. Корень ГД имеет наименьший номер. Узел, желающий передать групповую информацию, передает пакет New-Session, включающий *msd-id* и время поддержания группы. Соседние узлы, приняв пакет, по специальному алгоритму рассчитывают увеличенное значение *msd-id* (вес узла зависит от веса соседних узлов и расстояния до корня дерева) и передают его далее. Каждый узел сети поддерживает таблицу соседей, содержащую их *msd-id*, число ретрансляций от корня ГД, текущий статус (член или не член группы) и время членства. Каждый узел периодически передает “пакеты присутствия” (beacon), содержащие информацию о себе и своих соседях вида: идентификационный номер, *msd-id*, статус. Пакеты присутствия позволяют узлу корректировать таблицу соседей, а также обнаруживать отсутствие радиосвязности при их отсутствии определенное время.

Метод AMRoute расширяет применение метода СВТ для мобильных радиосетей. Он строит ГД зондовым способом, используя однопользовательское туннелирование (групповой пакет инкапсулируется в пакет индивидуальной адресации) для обеспечения связности между членами группы. Метод предполагает, что для каждой группы назначается главный узел, называемый ядром, — он будет корнем ГД. Все маршрутизаторы, к которым могут быть подключены потенциальные члены группы, знают адрес ядра. Основное отличие от СВТ — это динамическое назначение ядра группы, которое используется только для рассылки зондов (а не групповой информации).

Метод MAODV является групповой версией метода маршрутизации AODV [25]. Данный метод зондовым способом строит ГМ в виде дерева, в котором выделяет главный узел. Главный узел предназначен для поддержания групповой связности путем периодической рассылки GHM (Group Hello Messages) сообщений.

Метод CAMP осуществляет построение ГМ проактивно. Данный метод расширяет СВТ для построения ГМ в виде сети.

Поддержание ГМ может осуществляться *отправителем* или *получателем* групповой информации. В первом случае (метод ODMRP) процесс поддержания заключается в периодическом повторении процесса построения ГМ. При этом важную роль играет период регенерации групповых маршрутов передачи, который должен быть адаптирован к реальной ситуации на сети (типу трафика, объему входящей нагрузки, скорости и направлению перемещения узлов и др.).

Поддержание маршрутов, ориентированное на получателя (MAODV, AMRIS, CAMP), должно реализовать следующие ситуации:

- 1) выбор и активацию новых маршрутов при появлении новых членов группы;
- 2) “подрезание” (pruning) ветви ГД при выходе узла из состава группы;
- 3) восстановление ГД при выходе узла из его состава.

Рассмотрим поддержание маршрутов на примере метода MAODV (рис. 2.26). Узел s , желающий установить групповой маршрут, широковещательно рассылает ГЗЗ. Узел группового дерева, получивший ГЗЗ, по обратному пути сообщает ему ГЗО. Получив несколько ГЗО, узел s выбирает ближайший узел ГД (по критерию минимума числа ретрансляций) и посылает ему специальный пакет МАСТ (Multicast Activation) с флагом $J = 1$ (join).

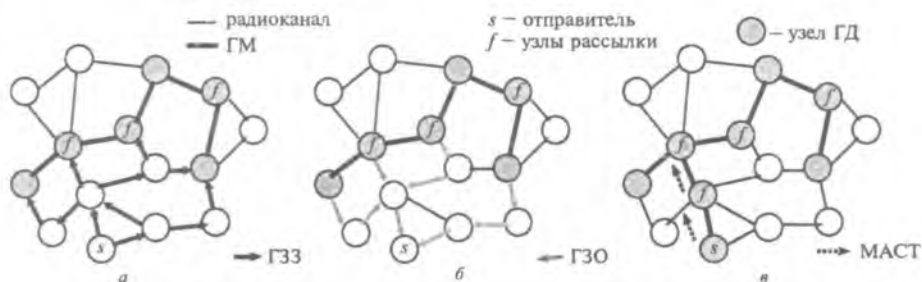


Рис. 2.26. Процесс формирования групповых маршрутов зондовым методом:
 а – рассылка ГЗЗ; б – передача ГЗО; в – передача МАСТ с $J = 1$

Выход узла a из состава группы (“подрезание” ветви ГД) осуществляется посылкой пакета МАСТ (рис. 2.27) с флагом $P = 1$ (prune) главному узлу ГД, который затем с помощью пакета GHM проинформирует об этом всех членов группы.

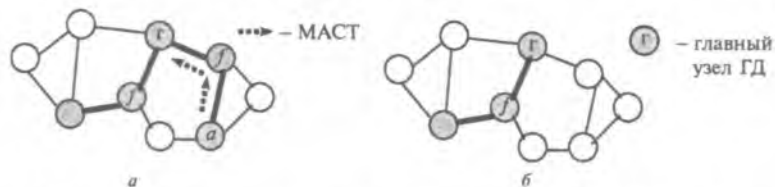


Рис. 2.27. Выход узла из состава группы: а – посылка МАСТ с $P = 1$; б – новое ГД



Рис. 2.28. Восстановление ГД: а – отказ канала ГД; б – восстановление связности ГД

Восстановление ГД осуществляется локальным зондированием (процесс рассылки и сбора зондов с ограниченным значением TTL) и показано на рис. 2.28.

Особенности NSMP. Построение групповых маршрутов передачи информации $G^r = \{s, f, r\}$ от множества узлов-отправителей $\{s\}$ к множеству узлов-получателей $\{r\}$ заключается в назначении в сети множества узлов $\{f\}$, ответственных за распространение групповой информации, и множества $\{N_{Gr}\}$ – соседей G^r , предназначенных для поддержания ГМ. Данный этап осуществляется путем периодической рассылки в сети групповых зондов-запросов (ГЗЗ) и сбора групповых зондов-ответов (ГЗО).

Зондирование всей сети осуществляется только на этапе построения ГМ и при обнаружении разделения сети на отдельные подсети; поддерживается ГМ локальным зондированием по G^r ; выделяется главный узел в ГМ при наличии нескольких отправителей; оптимизация периода регенерации группового маршрута происходит при $\Delta t_p = \min(TM_{r1}, \dots, TM_{rI})$, где TM_i – время переформирования маршрута.

Процесс функционирования метода NSMP показан на рис. 2.29.

Узел $s = \{4\}$ является узлом-отправителем групповой информации, а узлы $r = \{6, 13\}$ – получателями информации. Узлы $f = \{5, 9\}$ поддерживают кратчайшие маршруты. Совместно с узлами $N_{Gr} = \{1, 2, 3, 7, 8, 10, 12, 17\}$ образуют ГМ в виде сети. Отказ одного из групповых маршрутов не приводит к необходимости перестройки всей подсети, что значительно снижает служебный трафик по сравнению с групповой маршрутизацией на основе дерева источника. Так, при отказе канала (9–13) доставка информации может осуществляться по маршруту 4–8–12–13.

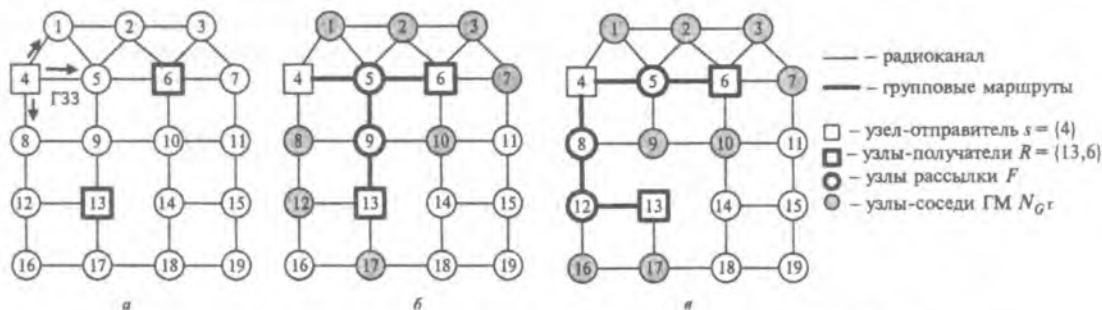


Рис. 2.29. Функционирование метода групповой маршрутизации NSMP:
а – рассылка ГЗЗ; б – построение G^r ; в – поддержание G^r

2.3.2. Оценка эффективности методов групповой маршрутизации

Рассмотрим основные преимущества и недостатки МГМ.

Преимуществами волновой рассылки групповой информации являются: простота реализации, надежность в доставке, независимость от маршрутных таблиц и

протоколов. Недостатки метода: значительная загрузка сети, маршрутизатор узла должен хранить в памяти все “недавно” полученные групповые пакеты от каждого источника для каждой группы и проводить поиск в этом списке при получении каждого пакета. При интенсивном групповом трафике это потребует больших затрат памяти и мощности процессора.

Метод AMRoute. Преимуществами метода являются: использование виртуальных каналов для построения ГД (нет необходимости поддерживать ГД в условиях его изменения), эффективное использование пропускной способности сети, поскольку не требуется периодической передачи пакетов с групповыми адресами, независимости от конкретного метода однопользовательской маршрутизации. Недостатки: возможно временное заикливание маршрутов, неоптимальное ГД и, как следствие, увеличение задержки в передаче сообщений.

Метод AMRIS. Преимущество: быстрота перестроения ГД, недостаток: наличие пакетов присутствия.

Метод MAODV. Преимущество: кратчайшие маршруты в ГД; недостатки: зависимость от протокола AODV, дополнительный служебный трафик главных узлов.

Метод ODMRP. Преимущества: малый объем групповых таблиц, получение кратчайших маршрутов, сетевая структура ГМ, быстрая реакция на изменение топологии сети, совместимость с однопользовательской маршрутизацией. Недостаток: сложность в расчете времени регенерации ГМ.

Метод CAMP. Преимущества: не требует зондовой рассылки, структура ГМ – сетевая, критерий выбора ГМ – кратчайшие маршруты. Недостатки; зависимость от протокола WRP, инерционность в обновлении маршрутов.

Общая характеристика МГМ представлена в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Метод МГМ, характеристика	AMRoute	ODMRP	AMRIS	CAMP	MAODV	NSMP	Волновой
Структура ГМ	Дерево	Сеть	Дерево	Сеть	Дерево	Сеть	Дерево
Заикливание ГМ	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Зависимость от однопользовательской маршрутизации	Да	Нет	Нет	Да	Да	Нет	Нет
Построение ГМ	З	З	З	Т	З	З	Волна
Поддержание ГМ	Т, Г, П	З, О	З, Г, О	Т, Г, П	З, Г, П	З, О, П, Г	–

Обозначения: З, Т – процесс построения (поддержания) ГМ осуществляется зондированием или таблично-ориентированным методами; Г – наличие главного узла в ГД; П, О – поддержание маршрута ориентировано на получателя или отправителя.

Имитационное моделирование основных МГМ проведено в работах [42, 43]. Исходными данными для моделирования были: число узлов $N = 50$, расположение

узлов – случайное на площади $1 \text{ км} \times 1 \text{ км}$, дальность радиосвязи – $r_{\text{п}} = 250 \text{ м}$, наличие модели радиоканала (затухание обратно пропорционально квадрату расстояния между узлами), скорость передачи в канале – $v_{\text{к}} = 2 \text{ Мб/с}$, средняя степень связности – $\bar{c} = 6,82$, входящая нагрузка – $g = 5 \text{ пакетов/с}$, размер пакета – $l_{\text{п}} = 512 \text{ байт}$, модель перемещения узлов – случайная, $v = 0-20 \text{ м/с}$, протокол доступа к каналу – IEEE 802.11, число узлов-получателей многоадресной информации – $|r| = 1-20$.

Сравнение существующих МГМ проводилось по следующим показателям:

- S – пропускной способности сети;
- $V_{\text{пис}}/V_{\text{дис}}$ ($N_{\text{пис}}/N_{\text{дис}}$) – соотношению объема (количества) информационных сообщений, переданных в сети (подсчитывается при каждой ретрансляции, т.е. для одного сообщения $V_{\text{пис}} = V_{\text{дис}} l$, где l – число его ретрансляций), к объему (количеству) сообщений, доставленных адресатам (заметим, что при однопользовательской маршрутизации $V_{\text{пис}}/V_{\text{дис}} \geq 1$, а при групповой – это соотношение может быть меньше единицы);

- $\delta = V_{\text{сс}}/V_{\text{дис}}$ ($N_{\text{сс}}/N_{\text{дис}}$) – соотношению объема (количества) переданной служебной информации к объему (количеству) полученной полезной информации – определяет эффективность использования служебных пакетов.

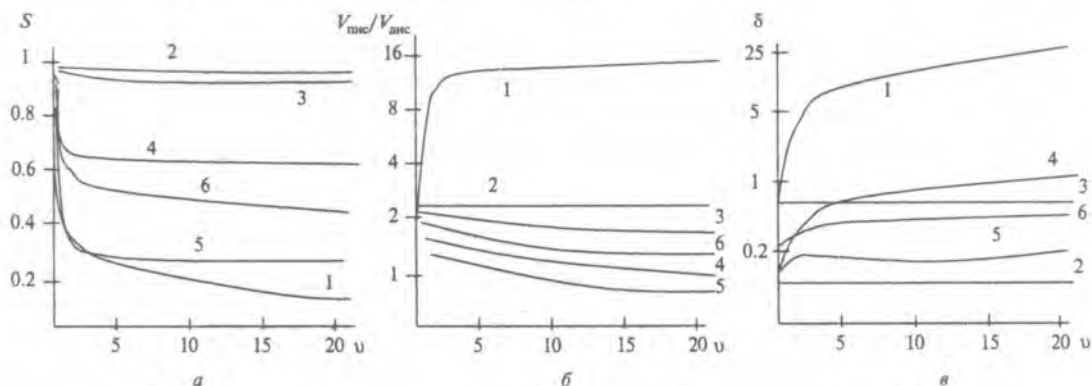


Рис. 2.30. Зависимости характеристик МГМ от скорости перемещения узлов и методов: 1 – AMRoute, 2 – волновой, 3 – ODMRP, 4 – CAMP, 5 – AMRIS, 6 – MAODV

На рис. 2.30 представлены зависимости S (а), $V_{\text{пис}}/V_{\text{дис}}$ (б), δ (в) от скорости перемещения узлов. Кроме того, исследовались зависимости данных показателей от изменения размеров группы и величины входного трафика. Наименьшее значение пропускной способности сети в условиях мобильности узлов из-за неоптимальности ГМ продемонстрировал метод AMRoute. Метод AMRIS эффективен при малом входном трафике, но чувствителен к его росту и увеличению мобильности узлов. Показатели метода MAODV резко ухудшаются при значительном групповом трафике и увеличении размеров группы. Метод CAMP показал лучшие характеристики в

сравнении с характеристиками МГМ, ориентированными на построение ГД (особенно при увеличении размеров группы). Однако данный метод при высокой мобильности узлов вызывает значительный рост служебного трафика. Метод ODMRP показал наивысшую пропускную способность при очень высокой мобильности узлов, однако в этих условиях функционирования сети целесообразнее использовать волновой метод. Кроме того, при увеличении размерности группы ODMRP значительно увеличивает свой служебный трафик.

Таким образом, в условиях мобильности узлов лучшими характеристиками обладают МГМ, основанные на сетевом построении ГМ. Приведем сравнение NSMP с методами, показавшими наилучшие характеристики: MAODV и ODMRP в предположении отсутствия системы позиционирования.

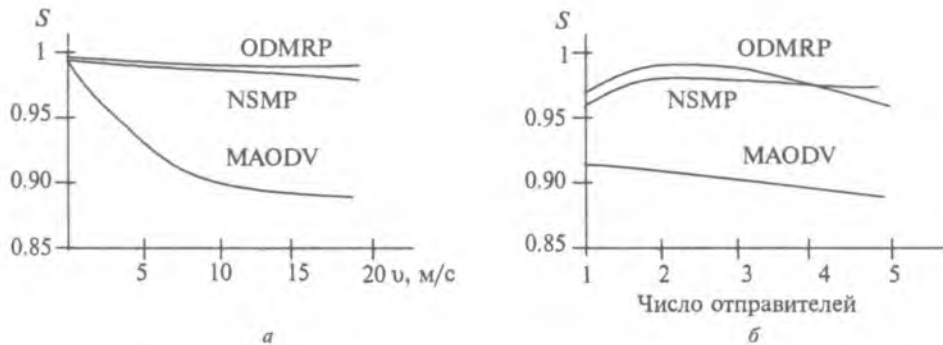


Рис. 2.31. Зависимости S от мобильности узлов (а) и числа отправителей (б)

На рис. 2.31 показаны зависимости S от мобильности узлов и количества отправителей. В стационарной сети пропускная способность для всех методов одинакова. С ростом динамики топологии характеристики MAODV (строит групповые маршруты в виде дерева) ухудшаются значительно быстрее в сравнении с NSMP и ODMRP (сетевая структура ГМ). Различие S для последних методов не более одного процента. Отличие связано с рассылкой NSMP локальных ГЗЗ, тогда как ODMRP осуществляет только глобальную рассылку ГЗЗ.

С ростом числа отправителей в группе от одного до двух пропускная способность NSMP и ODMRP увеличивается. Однако при дальнейшем увеличении числа отправителей S снижается с увеличением общего трафика в сети. Но поскольку NSMP уменьшает число передач как служебной, так и полезной информации, то S у него выше.

На рис. 2.32, а показана зависимость соотношения $N_{\text{пис}}/N_{\text{дис}}$ числа информационных сообщений, переданных в сети, к числу доставленных адресатам информационных сообщений от мобильности узлов сети. Лучшими характеристиками обладает MAODV (построение ГД). Метод ODMRP передает зонды на 20–30 % чаще

по сравнению с NSMP и MAODV. Параметры NSMP, строящего ГМ в виде подсети, близки к параметрам MAODV.

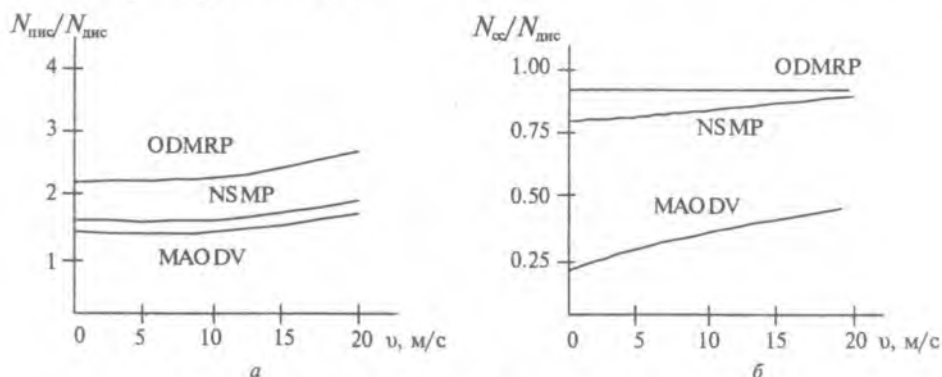


Рис. 2.32. Зависимости $N_{\text{пмс}}/N_{\text{дмс}}$ и $N_{\text{сс}}/N_{\text{дмс}}$ от мобильности узлов

На рис. 2.32, б показана зависимость соотношения числа служебных сообщений, переданных в сети, к числу доставленных адресатам информационных сообщений от мобильности узлов сети. Метод NSMP уменьшает объем служебного трафика на 5–15 % по сравнению с ODMRP.

2.4. Волновые алгоритмы передачи информации

Фундаментальным сервисом СРС является волновой способ передачи (ВСП) информации вследствие ширококвещательной природы радиоканала. ВСП применяется при передаче однопользовательской и групповой информации в условиях высокой динамики топологии сети, а также на этапах построения и поддержания маршрутов при использовании зондовой маршрутизации. Волновой способ передачи информации предполагает рассылку пакетов всем узлам сети: узел-отправитель ширококвещательно 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 номера пакета и идентификатора узла-отправителя. Если узел принимал пакет ранее, то он стирает его, иначе – ретранслирует. Процесс продолжается до тех пор, пока все узлы сети не получают данный пакет. Преимущества ВСП: простота реализации, распределенность выполнения, отсутствие необходимости сбора служебной информации о состоянии сети, высокая надежность доставки информации. Однако основным недостатком ВСП является резкий рост трафика, приводящий к увеличению столкновений пакетов и значительному снижению пропускной способности сети.

В настоящее время предложено большое количество волновых алгоритмов (ВА), позволяющих значительно уменьшить число ретрансляций пакетов при ВСП [44–48]. Рассмотрим математическую постановку задачи.

Модель сети представляется ненаправленным графом $G = (N, E)$, где $|N|$ – множество узлов, а $|E|$ – множество двунаправленных каналов. Каждый узел имеет идентификационный номер. Все передаваемые узлы имеют одинаковую мощность. Применяется один из протоколов канального уровня (например, IEEE 802.11).

Необходимо: разработать волновые алгоритмы передачи информации U_ρ^B , $\rho = \overline{1, P}$, обеспечивающие доставку пакетов в СРС при минимизации числа ретрансляций $U_\rho^{B*} = \arg \min_{U_\rho^B \in U^B} |F|, F \subset G$.

С точки зрения теории графов данная задача интерпретируется следующим образом [49]: вычислить наименьшее связное доминирующее множество (НСДМ) узлов сети для ретрансляции сообщений. Для ее решения необходимо знание информации о связности всей сети, что для СРС невозможно (ВА должен быть распределенным). Так как данная задача относится к классу NP -полных [45, 46], то получение точного решения за приемлемое время возможно лишь при ограниченной размерности сети. Для ее решения предложен ряд приближенных волновых алгоритмов, которые по способу выбора ретрансляторов можно классифицировать на две группы: случайный выбор ретранслятора и детерминированный (рис. 2.33).



Рис. 2.33. Классификация волновых алгоритмов передачи информации

1. Случайный выбор ретранслятора. При случайном способе каждый узел ретранслирует пакет с вероятностью p и стирает его с вероятностью $1 - p$. Данное решение может приниматься путем обмена служебной информацией с соседними узлами (кооперировано) или на основании содержимого принимаемых сообщений (изолировано). Значение p может быть фиксированным (не изменяется в процессе передачи пакета) или адаптивным (изменяется при каждой передаче пакета в зависимости от условий функционирования узла и состояния локальной зоны сети).

Исследования двух ВА с фиксированной вероятностью передачи при различных параметрах сети (размерность, степень связности узла и др.) проведены в [46]:

- $ВА_1(p, k)$ осуществляет k -ретрансляций согласно ВСП ($p = 1$), а далее пакет передается с вероятностью p ;

- $BA_2(p_1, k, p_2, C)$ осуществляет k -ретрансляций пакет передается с вероятностью p_1 , а далее – с вероятностью p_1 при $c_i < C$ и p_2 при $c_i > C$, где c_i – текущая степень связности i -го узла; C – пороговое значение степени связности.

Результаты моделирования ВА с фиксированной вероятностью передачи ($p = 0,65-0,85$, $k = 2, 3, 4$) продемонстрировали сокращение служебного трафика до 35 % при следующих параметрах функционирования сети: размерность – сети $N = 150$, ее диаметр – $d = 15$, средняя степень связности $\bar{c} = 8$. Однако фиксированная вероятность передачи пакета определяется отправителем и не позволяет учесть конкретные условия функционирования узла или участка сети. Поэтому целесообразней осуществлять адаптацию p при каждой ретрансляции пакета. Например, передача пакета узлом i может определяться случайной задержкой передачи z_i , значение которой может рассчитываться по следующим параметрам [46]:

- количеству принятых копий пакета (алгоритм BA_3). Первоначально при приеме пакета узел i разыгрывает значение задержки передачи в интервале $z_i = [0 - z_{\max}]$. При приеме дубликата пакета значение z увеличивается на единицу;

- количеству прошедших ретрансляций пакета (алгоритм BA_4) – $z_i = b(h-1) + a$, где b – константа; h – число ретрансляций пакета; a – случайное число в интервале $0-1$. Этот алгоритм позволяет реализовывать стратегию “передача адресату с минимальным числом ретрансляций” (узлы, находящиеся на большем расстоянии от отправителя, быстрее передают пакет);

- относительной степени связности i -го узла (алгоритм BA_5): $z_i = (\max c_j) / c_i$, где $\max c_j$ – максимальная степень связности среди соседних узлов $j \in N_i, j \neq i$; c_i – степень связности i -го узла.

При превышении задержкой определенного порога $z_i > Z$ или при прослушивании передач всеми соседними узлами N_i узел i не ретранслирует пакет.

В алгоритме BA_6 в качестве параметра принятия решения о ретрансляции применяется площадь покрытия. Узел может отказаться от передачи пакета при незначительном расстоянии от передающего узла. Смысл данного правила: если узел находится вблизи передающего узла, то он незначительно увеличит площадь покрытия. Оценку близости узлов можно проводить измерением уровня принимаемого сигнала (при знании мощности передачи) или используя систему позиционирования. В последнем случае при ретрансляции каждый узел добавляет в пакет свои координаты. При приеме таких сообщений от соседних узлов $j \in N$ узел i вычисляет разность в площади покрытия $\Delta s_i = s_j - s_i$. При превышении определенного порога ($\Delta s_i > S$) пакет передается далее, иначе – стирается, причем данный порог варьируется в зависимости от степени связности узла $S = \psi(c)$: слабо связный участок сети – значение S меньше (пакет передается чаще), и наоборот.

Можно отметить, что BA_3 и BA_4 принимают решение о передаче изолированно, а BA_5 и BA_6 кооперировано, так как требуют информации о связности (координатах) своих соседей.

2. Детерминированный (селективный) выбор ретрансляторов. Детерминированные ВА по типу имеющейся информации о состоянии локальной зоны сети делятся на графовые (узел владеет информацией о связности) и координатные (используется система позиционирования), при этом ограничение зоны рассылки пакетов будет осуществляться способами, используемыми при координатной маршрутизации: ограничением расстояния и применением правил направленного зондирования [47, 48].

Рассмотрим некординатные ВА. Предполагается, что каждый узел сети путем обмена hello-сообщениями поддерживает информацию о связности со своими соседями, находящимися на расстоянии одного или двух ретрансляционных участков. Данное условие является довольно распространенным при использовании большинства методов маршрутизации. Рассмотрим два основных детерминированных ВА:

1) каждый узел путем обмена hello-сообщениями поддерживает информацию о связности со своими соседями. Здесь используется алгоритм BA_7 ; при передаче широковещательного пакета узел i включает в заголовок список своих соседних узлов N_i . Узел j , приняв пакет, вычисляет $F = N_j - N_i - j$ и принимает решение о дальнейшей его ретрансляции. Если $F \neq \emptyset$, то j передает пакет, иначе — стирает;

2) каждый узел поддерживает информацию о связности с соседними узлами на расстоянии двух ретрансляционных участков.

Дано: узел j — отправитель пакета, ему известно множество соседей, находящихся на расстоянии одного N_j и двух ретрансляционных участков $N(N_j)$, и информация об их связности. *Необходимо найти* подмножество $F \subseteq N_j$, покрывающее все множество $U = N(N_j)$. Нахождение наименьшего множества F является NP -полной задачей. Для ее приближенного решения относительно узла j может быть предложен следующий алгоритм.

1. Пусть $F = \emptyset$, $Z = \emptyset$ — множества покрытых узлов, $K = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$, где $P_k = N_k \cap U (1 \leq k \leq m)$, $k \in N_j$.

2. Найти множество P_k , имеющее максимальный размер в множестве K .

3. $F = F \cup \{k\}$, $Z \cup \{P_k\}$, $K = K - \{P_k\}$, $P_l = P_l - P_k \quad \forall P_l \in K$.

4. Если $Z = U$, то алгоритм закончить, иначе — перейти к шагу 2.

Для уменьшения числа передач предлагается использовать BA_8 , позволяющий учесть предыдущую передачу узла, т.е. множество $U = N(N_j) - N_i - N_j$ (рис. 2.34).

Узел j , приняв пакет от узла i , определяет множество передающих узлов $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\} \subseteq B_{i,j}$, где $B_{i,j} = N_j - N_i$, таких, чтобы $\bigcup_{f_j \in F} (N_{f_j} \cap U) = U$.

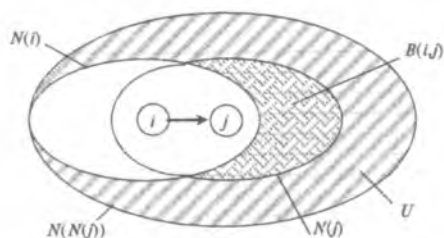
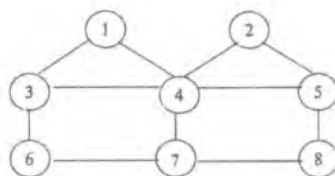
Рис. 2.34. Иллюстрация применения VA_8 

Рис. 2.35. Пример сети

Пример использования VA_7 и VA_8 рассмотрим для сети, представленной на рис. 2.35. Допустим, что узел 4 является отправителем. При применении VA_7 узлы 1 и 2 не будут передавать пакет и общее число передающих узлов $|F|$ равно 6. При применении VA_8 узел 4 определит множество узлов, которым осталось доставить пакет: $U = N(N_4) - N_4 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\} - \{1, 2, 3, 4, 5, 7\} = \{6, 8\}$. Тогда оптимальное множество передающих узлов равно $\{7\}$. Следовательно, для получения пакетов всеми узлами сети необходимы передачи только двух узлов — 4 и 7, т.е. $|F| = 2$.

Оценка эффективности основных ВА ($BCП$, VA_3 , VA_5 , VA_6 , VA_8) проводилась с помощью имитационного моделирования по следующим характеристикам: вероятности доставки пакетов P_d и числу ретрансляций $N_{рет}$ при различных условиях ее функционирования (количество узлов сети — N , интенсивность входящего трафика — λ , скорость узлов — ν). Проведенный анализ различных ВА позволяет сделать следующие выводы. Лучшими характеристиками в своей области при различных условиях функционирования сети обладают VA_8 и VA_5 : VA_8 целесообразней использовать в статичной и малодинамичной сети, а также при ее перегрузке, а во всех других случаях — применять VA_5 .

2.5. Методы иерархической маршрутизации в радиосетях большой размерности

Одной из основных проблем оперативного управления СРС является маршрутизация информационных сообщений. Методы маршрутизации в существующих сотовых сетях мобильной связи (IS-41, GSM, IS-95A [50–52]), 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 использованы в СРС. Методы маршрутизации, применяемые в СРС малой размерности (десятки узлов) [13], не могут быть использованы в сетях с большим количеством узлов (сотни, тысячи). Исследования СРС большой размерности [53] показали, что даже незначительное повышение ди-

динамики топологии сети приводит к значительному росту служебного трафика. Интенсивность служебного трафика возрастает квадратично: $N^2\nu$, где N – множество узлов сети и ν – интенсивность топологических изменений. Теоретические исследования, проведенные в [53], показали, что в случайной СРС пропускная способность узла s_y ограничена величиной $\Theta(W/\sqrt{N \log N})$, где W – скорость передачи узла (бит/с). При значительном увеличении размерности сети имеем $s_y \rightarrow 0$. Очевидно, что для решения этой проблемы необходимо ввести иерархическое управление сетью – провести разбиение СРС на отдельные зоны (кластеры) с выделением главных узлов зоны (ГУЗ), узлов-шлюзов и внутренних узлов (рис. 2.36) [54, 55]. Множество ГУЗ и выделенные узлы-шлюзы образует в сети виртуальную магистраль, которая может использоваться как для распространения маршрутной информации, так и для передачи информационных сообщений. В качестве ГУЗ могут выступать выделенные узлы (например, МБС или энергонезависимые узлы) или любой МА.

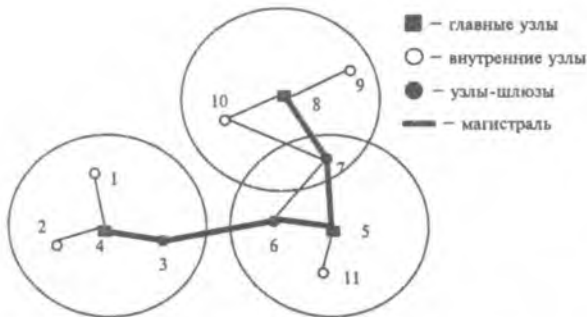


Рис. 2.36. Иерархическая организация СРС

Варианты построения методов иерархической маршрутизации (МИМ) представлены на рис. 2.37. С ростом количества узлов (несколько тысяч) СРС может быть организована в m -уровневой иерархии [55]. Однако это значительно усложняет процесс управления сетью. Поэтому на практике чаще используют двух- или трехуровневую организацию сети.

Размер зоны r_z измеряется минимальным числом ретрансляционных участков от ГУЗ до узла-шлюза

за или ее диаметром d_z . На рис. 2.37 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). Параметрами формирования зон могут выступать идентификационный номер, связность узла или его “вес”.

Сбор информации о состоянии сети и вычисление маршрутов могут быть осуществлены с использованием алгоритмов Дijkstra, Беллмана–Форда и др.

Очевидно, что иерархическая организация СРС позволит:

- увеличить стабильность сетевой топологии (динамика изменения зоны сети значительно ниже динамики изменения связности для отдельных узлов сети);
- многократно использовать частотный (кодовый) радиоресурс за счет его пространственного разнесения;
- повысить эффективность управления сетью (главный узел зоны может эффективней управлять ресурсами своей зоны по сравнению с центром управления сетью).

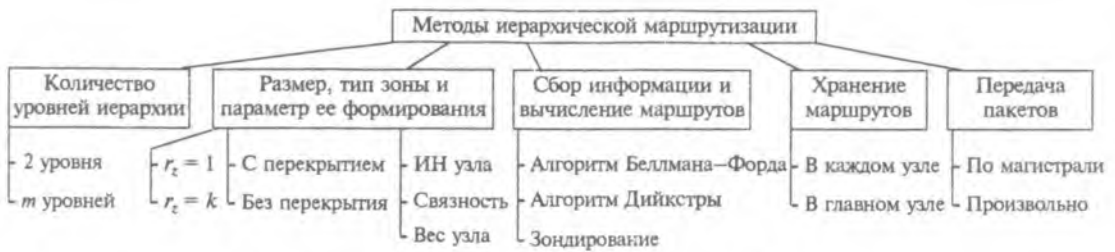


Рис. 2.37. Варианты построения методов иерархической маршрутизации

Однако иерархическая организация сети усложняет процесс управления сетью и предполагает решения следующих задач [55]: динамическое создание и поддержание зон сети; динамическая адресация абонентов; внутрizonная и межzонавая маршрутизация пакетов; восстановление управления зоной вследствие отказа (уничтожения) ГУЗ.

2.5.1. Алгоритмы динамического создания и поддержания зон сети

Разделение сети на зоны (кластеризация) может преследовать различные цели управления сетью: сосредоточение основного трафика внутри зон сети, минимизирование служебного трафика, минимизирование размеров маршрутных таблиц. Данные цели могут быть достигнуты за счет ограничения количества зон в сети, минимизации межzонных связей, ограничения числа узлов в зоне или ее размера. С точки зрения маршрутизации такая постановка задачи будет определять: объем служебного трафика, который зависит от размера маршрутных таблиц, числа и размера маршрутных сообщений; изменение длины строящихся маршрутов.

Математическая постановка задачи. Сеть представлена в виде ненаправленного весового графа $G = (V, E)$, где V – множество узлов, E – множество каналов; известны: “стоимости” передачи информации по каналам $c - e \rightarrow R^+$, $e = \overline{1, E}$, максимальная стоимость передач в зоне – C_z^{\max} и максимальное число узлов в зоне – N_z^{\max} (максимальный размер зоны r_z^{\max}).

Необходимо провести разбиение V на k множеств $V_1, \dots, V_i, \dots, V_k$ так, чтобы связный подграф $G_i = (V_i, E_i) \subseteq G$ удовлетворял следующим условиям:

$$1) \sum_{e \in G_i} c(e) \leq C_z^{\max} - \text{суммарная стоимость передач в зоне не должна превышать}$$

максимального значения;

$$2) |V_i| \leq N_z^{\max} \text{ (или } r_z \leq r_z^{\max} \text{)} \forall i \in \{1, 2, \dots, k\} - \text{ограничение числа узлов в зоне (размеров зоны);}$$

3) $\min \sum_e c(e)$, $e \in E$, $e \notin E_i$, $i \in \{1, 2, \dots, k\}$ $\forall k \in \{1, 2, \dots, |V|\}$ – минимальное число межзоновых связей.

ло межзоновых связей.

Данная задача относится к классу *NP*-полных [56]. Для произвольного графа к настоящему времени не известны эффективные алгоритмы ее решения, удовлетворяющие всем перечисленным требованиям. Кроме того, она требует знания всей информации о состоянии сети (что проблематично в СРС) и поэтому для построения зон используют эвристики. Данные эвристики должны удовлетворять следующим требованиям: асинхронному функционированию, генерации ограниченного числа сообщений, выполнению условия математической постановки задачи.

Для формирования иерархической организации сети рассмотрим два распределенных алгоритма разделения сети на зоны с одновременным формированием главных узлов, внутренних узлов и шлюзов [55]. Предполагается, что каждый узел в сети имеет идентификационный номер (ИН), поддерживает связность со своими соседями путем периодической передачи hello-сообщений, все сообщения передает правильно, мощность передач узлов одинакова, сетевая топология во время выполнения алгоритма не изменяется. Данные алгоритмы отличаются критерием выбора главного узла в зоне: минимальным ИН или максимальной степенью связности (число соседних узлов – N_i). Формальное описание базового алгоритма:

- каждый узел периодически широковещательно передает hello-сообщения, содержащие список “соседних узлов” (включая себя);
- узел, имеющий наименьший ИН (максимальную степень связности среди соседних узлов), становится главным узлом и передает это решение своим соседям (рис. 2.38, *a* и *b*);
- главный узел, принявший сообщение от узла с минимальным ИН (максимальной N_i), передает ему функции главного узла;
- узел, принявший сообщение от двух и более главных узлов, становится шлюзом;
- в остальных случаях – он является внутренним узлом.

Доказано, что за конечное время сеть будет разделена на зоны (с диаметром $d = 2$) и два главных узла никогда не будут связаны непосредственно между собой [55]. Временная сложность алгоритма равна $O(N)$, где N – число узлов СРС.

В качестве примера на рис. 2.38 показан результат функционирования алгоритмов динамического разбиения сети на зоны. 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 рис. 2.39 показана трехуровневая зонавая организация сети. Для 1-го уровня используется один из алгоритмов кластеризации для создания и поддержания главных узлов, внутренних узлов и узлов-шлюзов. Для данного примера сеть разбита на восемь зон 1-го уровня: главные узлы в зонах – 1, 2, 3, 4, 21, 22, 23, 24; внут-

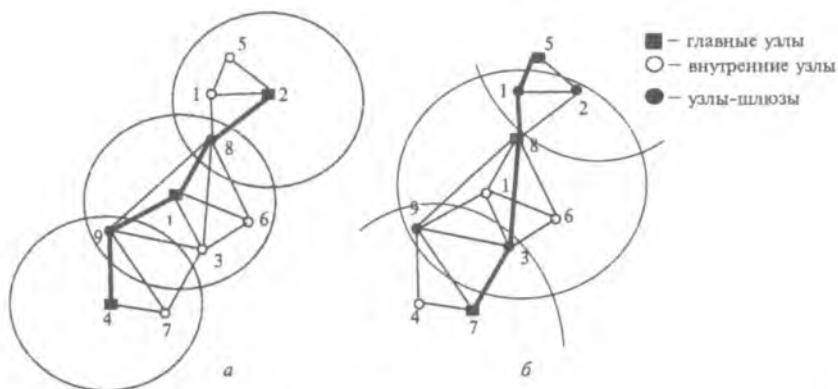


Рис. 2.38. Результат функционирования алгоритмов кластеризации: *a* – с минимальным значением ИН; *б* – с максимальным значением связности

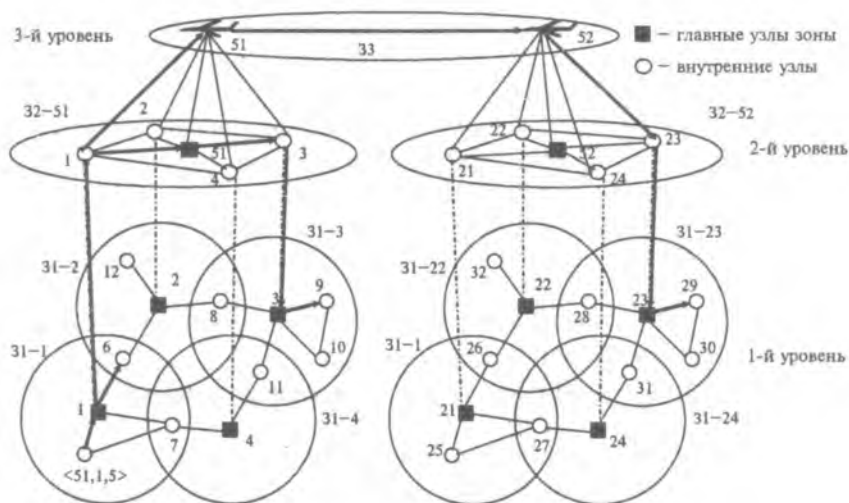


Рис. 2.39. Трехуровневая зональная организация СРС

ренные узлы – 5, 9, 10, 12, 25, 29, 30, 32; узлы-шлюзы – 6, 7, 8, 11, 26, 27, 28, 31. На главный узел возлагаются функции распределения ресурсов между зонами (частотное, временное или кодовое разделение каналов) и распространения маршрутной информации. Каждый узел в зоне располагает информацией об узлах своей зоны. 2-й уровень состоит из всех главных узлов 1-го уровня. На рис. 2.39 представлены две зоны 2-го уровня. Главные узлы зон 2-го уровня выступают как домашние агенты – 51, 52 (в данной ситуации их роль выполняют ретрансляторы на БЛА), главные узлы 1-го уровня – как внутренние агенты.

Однако рассмотренные алгоритмы самоорганизации сети имеют ряд недостатков: формирование зон происходит в условиях статичной сети, главные узлы в сети распределяются ими неоднородно. Преимуществом алгоритма разделения сети на зоны по критерию максимальной N_i по сравнению с критерием минимального ИН является уменьшение числа формируемых зон, а недостатком — уменьшение стабильности зоны при увеличении динамики топологии. Поэтому для увеличения стабильности зоны в качестве критерия выбора зоны целесообразно использовать величину мобильности узла.

Кроме мобильности и степени связности, каждый узел может характеризоваться рядом параметров, влияющих на процесс иерархической организации сети: мощностью передачи узла, оставшейся энергией батареи, нагрузкой и т.п. Например, оптимизация количества зон и ее размеров может осуществляться путем изменения мощностей передач узлов (уменьшение мощностей передач приводит к уменьшению внутрисистемных помех, повышению разведзащищенности, увеличению пропускной способности сети, но в то же время ведет к возрастанию числа зон и, следовательно, к увеличению нестабильности сети в целом). Поэтому в качестве метрики выбора ГУЗ (веса w_x узла x) предлагается использовать аддитивную свертку параметров его функционирования:

$$w_x = w_1 M_x + w_2 P_x + w_3 E_x + w_4 N_x + w_5 \text{ИН}_x,$$

где $M_x, P_x, E_x, N_x, \text{ИН}_x = 0, \dots, 1$ — нормализованные значения мобильности, мощности передачи узла, оставшегося энергоресурса батарей, степени связности и идентификационного номера; w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 — коэффициенты, учитывающие значения этих факторов ($w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 = 1$). Критерием выбора ГУЗ является минимальное значение его веса — $\min w_x$.

Предложенный алгоритм выбора ГУЗ адаптируется к условиям функционирования сети на основе весов параметров сети и содержит следующие шаги.

1. Каждому узлу i сети определить множество соседних узлов N_i , т.е. свое значение степени связности $c_i = |N_i| = \sum_{j \in N_i} (d_{ij} < r)$, где r — радиус (мощность) передачи

узла; d_{ij} — расстояние между узлами i и j .

2. Каждому узлу вычислить относительную степень связности $\Delta c_i = |c_i - c_{\max}|$.

3. Вычислить сумму расстояний со своими соседями $D_i = \sum_{j \in N_i} d_{ij}$.

4. Найти среднюю мобильность (скорость) узла в интервале T

$$M_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sqrt{(x_t - x_{t-1})^2 + (y_t - y_{t-1})^2},$$

где (x_t, y_t) и (x_{t-1}, y_{t-1}) — координаты узла i в моменты времени t и $t-1$ соответственно.

5. Вычислить время t , в течение которого данный узел выполняет функции главного узла с учетом оставшейся энергии батарей.

6. Определить вес каждого узла $w_x = w_1 M_x + w_2 P_x + w_3 E_x + w_4 N_x + w_5 ИН_x$.

7. Выбрать в качестве ГУЗ узлы, имеющие наименьший вес.

8. Повторить шаги от 2 до 7 для оставшихся узлов для назначения главных узлов зон.

Поддержание зоны может осуществляться повторением процесса формирования зоны, что довольно неэффективно. Поэтому стабильность зоны может поддерживаться регулированием мощностей передач узлов в зоне, а также реализацией следующих “правил поведения” узлов:

- при перемещении внутреннего узла из одной зоны в другую главные узлы в зонах не изменяются;
- в случае перемещения внутреннего узла 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 (путем изменения его веса).

2.5.2. Динамическая адресация абонентов сети

В существующих иерархических методах маршрутизации [52, 56] каждый узел сети содержит информацию о том, как достичь любого узла своей зоны и как достичь другой зоны. Адрес узла включает имя зоны сети. Например, если узел i должен послать сообщение узлу j , находящемуся в другой зоне, то он сначала должен найти адрес узла в зоне x и только тогда может использовать маршрутную таблицу для отправки сообщения. Таким образом, необходимо поддерживать адресную базу данных, состоящую из имен каждого узла сети и его адреса (т.е. принадлежность к зоне), и зонную базу данных – список имен узлов каждой зоны и имя граничного узла, используемого для ее достижения. Существование адресной и зонной баз данных требует дополнительных ресурсов сети для корректировки адресной информации, возникающей при изменении принадлежности узла к зоне.

Для избежания зонной и адресной баз данных иерархический адрес может содержать узловую принадлежность к зоне. Например, если узел i зоны Z будет иметь адрес “ $Z.i$ ”, то это позволит каждому узлу знать, что узел i принадлежит зоне Z . Однако такой подход статичен и не в состоянии отслеживать топологические изменения. Таким образом, необходим динамический механизм установления соответствия узлов зонам – суперзонам при топологических изменениях.

Для организации адресации абонентов предлагается применить динамическую иерархическую адресацию [55, 56]. Каждый узел сети имеет свой идентификационный номер, определяющий его физический (MAC – Media Access Control) адрес (на рис. 2.39 показаны MAC-адреса). Иерархический адрес (ИА) получается конкатенацией адресов иерархий зон. Например, ИА узла 5 равен $\langle 1, 1, 5 \rangle$ (см. рис. 2.39). Иерархический адрес позволяет, используя таблицы маршрутизации, направлять

пакеты к адресату. Так, передача пакета от узла 5 с ИА $\langle 1, 1, 5 \rangle$ к узлу 10 с ИА $\langle 1, 3, 9 \rangle$ осуществляется по следующему маршруту: 5–1–3–9.

Преимущество иерархической адресации – децентрализованная корректировка ИА и минимизация размеров маршрутных таблиц. При неиерархической маршрутизации размеры маршрутных таблиц оцениваются величиной $O(N \times N)$ при применении предложенного метода $O(N_z \times q)$, где N – число узлов в сети; N_z – среднее число узлов в зоне; q – число главных узлов. Основной недостаток МИМ – это необходимость корректировки (поддержания) ГУЗ и ИА адресов из-за перемещения узлов.

Логическая организация предполагает назначение в дополнение к MAC-адресам узлов логических адресов, состоящие из двух полей (ИН подсети, ИН узла). Логический адрес схож с IP-адресом и может рассматриваться как адрес доступа в сеть. Каждая IP-подсеть является виртуальной, определяет группу пользователей (танковый батальон, взвод солдат и т.п.), охватывает несколько физических зон и имеет одного домашнего агента НА (Home Agent) [15], хранящего информацию об адресе того или иного узла. Роль домашнего агента (ДА) может выполнять любой главный узел. При изменении своего местоположения узел информирует узел-ДА о новом иерархическом адресе (на рис. 2.39 показано пунктирной линией). Передача пакета от узла s к узлу d может осуществляться следующим образом:

- посылка запроса домашнему агенту об иерархическом адресе d ($s \rightarrow \text{ДА}_d$), получение его адреса ($\text{ДА}_d \rightarrow s$), непосредственная пересылка пакета адресату ($s \rightarrow d$) (рис. 2.40, а);
- пересылка пакета домашнему агенту ($s \rightarrow \text{ДА}_d$), далее адресату ($\text{ДА}_d \rightarrow d$) (рис. 2.40, б).

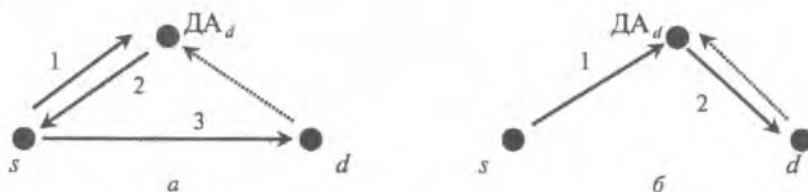


Рис. 2.40. Процесс передачи пакета с использованием узлов-ДА

Преимуществом логической организации является отделение от физической иерархии процесса управления мобильностью узлов (в отличие от существующих методов иерархического управления, требующих значительного обмена служебной информацией при изменении физических зон сети). Предложенный МИМ решает эту проблему введением домашнего агента для каждой подсети для изменения (поддержания) ИА ее членов. Данный подход схожий с использованием службы DNS (Domain Name Service), применяемой в сети Интернет [5]. Служба DNS обеспечивает соответствие между символьным именем и сетевым адресом, который по-

зволяет, используя таблицы маршрутизации, передавать пакеты непосредственно адресату. В беспроводных сетях Mobile IP пакет передается домашнему агенту, который и передает пакет мобильному пользователю [15]. Однако в СРС отсутствует фиксированный домашний агент. Поэтому в СРС необходима регистрация и поддержание ИА.

Все домашние агенты зарегистрированы в маршрутных таблицах верхнего уровня и распространяются всем узлам вместе с маршрутными таблицами. Регистрация ИА представляет собой процесс корректировки базы данных иерархических адресов локальной подсети у своего домашнего агента. Каждый мобильный узел ассоциируется с двумя адресами: логическим (используется для идентификации получения пакета транспортным уровнем) и иерархическим (используется для маршрутизации в МИМ). Для регистрации в логической подсети каждый ее член посылает домашнему агенту регистрационное сообщение, содержащее два поля: свой ИН и текущий ИА. Приняв регистрационное сообщение, узел-ДА создает новую запись в своей базе данных или корректирует старую. Регистрация осуществляется двумя способами: периодически и по событиям (при перемещении узла в новую зону). При отсутствии регистрационного сообщения от произвольного узла определенный промежуток времени учетная запись о нем стирается. Перемещение узлов одной подсети (например, танкового батальона) носит групповой характер, и поэтому трафик регистрации имеет незначительную величину.

2.5.3. Маршрутизация пакетов

Маршрутизация пакетов предполагает выполнение следующих функций (см. рис. 2.39) [54]: сбор информации о состоянии сети и вычисление маршрутов (могут использоваться различные методы маршрутизации: таблично-ориентированные, зондовые и волновые); хранение маршрутов (состав маршрутных таблиц ГУЗ, внутренних узлов и шлюзов); пересылка пакета (внутри и за пределами зоны).

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; расстояние, выраженное числом ретрансляционных участков; последовательный номер маршрута, предназначенный для исключения зацикливания маршрутов. Каждый внутренний узел поддерживает только зондовую таблицу. Узлы-шлюзы содержат информацию об узлах смежных зон.

Транспортный уровень обеспечивает доставку пакетов в сети на основе IP-адресов. Поэтому необходимо обеспечить преобразование IP-адресов в MAC-адреса. Когда отправитель желает послать пакет адресату (зная его IP-адрес), он определяет из своей маршрутной таблицы ИА соответствующего домашнего агента (или получает его от главного узла, так как все ДА хранятся на верхнем уровне иерархии) и посылает ему пакет. Домашний агент находит в своей таблице ИА адресата и передает ему пакет. Адресат сообщает отправителю свой ИА. Таким образом, отправитель и адресат будут знать ИА друг друга и обмен информацией (в ближайшее время) будет осуществляться непосредственно между ними.

В зависимости от ситуации передача пакетов может происходить различными путями (см. рис. 2.39).

1. Узлы находятся в одной зоне (отправитель узел 5 – адресат узел 6). Узел 5 передает пакет узлу 1, узел 1 определяет в своей таблице принадлежность узла 6 к своей зоне и пересылает ему пакет.

2. Узлы находятся в разных зонах (отправитель узел 5 – адресат узел 9). Маршрут передачи: 5–1 (находит адрес ДА, т.е. узел 51)–51 (определяет, что узел 9 находится в зоне узла 3)–3–9. Узел 3 сообщает узлу 1 свой ИА.

3. Узлы находятся в разных зонах обслуживания ретрансляторами на БЛА (отправитель узел 5 – адресат узел 29). Маршрут передачи: 5–1 (узел 1 не находит узел 29 в своей зоне, находит адрес ДА, т.е. узел 51)–51 (находит адресат в зоне узла 52)–52–23–29.

В зависимости от загрузки и производительности магистрали передача пакетов может осуществляться по магистрали или без нее (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).

2.5.4. Оценка эффективности методов иерархической маршрутизации

Оценку иерархического и неиерархических методов маршрутизации проведем на основе алгоритмического подхода. Каждый метод маршрутизации реализуется совокупностью алгоритмов, которые характеризуются временной, связной и вычислительной сложностью. Для облегчения анализа 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.

Будем рассматривать 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).

Сравнительная характеристика иерархических и неиерархических ММ представлена в табл. 2.7. Анализ данной таблицы показывает, что применение МИМ позволяет значительно уменьшить служебный трафик в сети (особенно внутризонавый). Для уменьшения межзонавого служебного трафика маршрутизацию пакетов целесообразно осуществлять гибридными методами: между зонами – зондовыми, а внутри зоны – таблично-ориентированными.

Доказано, что если для m -уровневой сети все зоны 1-го уровня имеют диаметр, меньше или равный d_z . Тогда $h = L_{\text{мин}} / L_{\text{кр}} \leq 2^{k-2}(2 + d_z) - 1$ для $2 \leq k \leq m$, где $L_{\text{мин}}$ – длина пути между различными узлами в k -зонах ($k \leq m$) и $L_{\text{кр}}$ – кратчайшая длина пути между этими узлами.

Таблица 2.7

Методы маршрутизации		Наихудший случай		V_{MT}
		V_{cc}	$t_{пм}$	
Неиерархические				
Класс Дейкстры		$O(N)^*$	$O(d)^*$	$O(N^2)$
Класс Беллмана—Форда		$O(N^2)$	$O(N)$	$O(N \cdot C)$
Зондовые		$O(N)$	$O(2d)$	$O(N \cdot C)$
Иерархические				
Класс Дейкстры	Внутреннее изменение Внешнее изменение	$O(N_z \cdot C)^*$ $O(Z \cdot C \cdot l) +$ $O(N_z \cdot C \cdot Z)^*$	$O(d_z)^*$ $O(d_b \cdot l) + O(d)^*$	$O(Z^2 + N_z^2)$
Класс Беллмана—Форда	Внутреннее изменение Внешнее изменение	$O(N_z^2)$ $O(N^2)$	$O(N_z)$ $O(N)$	$O[(N_z + Z) \cdot C]$
Гибридный	Внутреннее (Беллмана—Форда) Внешнее (зондирование)	$O(N_z^2)$ $O(N)$	$O(N_z)$ $O(2d)$	$O[(N_z + Z) \cdot C]$

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.

Последняя задача иерархического управления — это обеспечение живучести данной сети. В случае отказа ГУЗ необходимо назначить новый главный узел и восстановить в нем маршрутные таблицы. Возможным решением может быть следующее: 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 маршрутных таблиц.

2.6. Многопутевая маршрутизация

Многопутевая маршрутизация позволяет увеличить надежность доставки информации (при отказе используется альтернативный маршрут), сократить объем служебной информации (реже осуществляется перестроение маршрута) и уменьшить время доставки информации (при распределении входящей нагрузки по нескольким независимым маршрутам передачи).

Идея построения нескольких маршрутов между парой узлов сети не нова. Так, например, в Интернете функционирует протокол OSPF, позволяющий выбирать несколько маршрутов одинаковой стоимости к адресату [5]. Однако применение данного протокола в СРС не представляется возможным вследствие значительного служебного трафика в условиях динамики топологии. К тому же, протоколы OSPF и RIP относятся к классу таблично-ориентированных ММ, которые предполагают постоянный обмен маршрутной информацией для построения маршрутных таблиц

(что не всегда представляется возможным – например, при выполнении требования скрытности). Только два представителя данного класса – TORA [28] и DSR [30] – потенциально предусматривают возможность построения нескольких маршрутов передачи информации. Данные методы используют дополнительные пути при отказе от первичного маршрута. Однако они не предусматривают построение полностью независимых путей передачи. Рассмотрим критерии выбора независимых путей.

1. Независимость путей по узлам, что позволяет разделить входящий трафик и тем самым равномерней загрузить сеть, уменьшить задержку в передаче сообщения.

2. Минимальная разница длины альтернативного пути по сравнению с первичным (кратчайшим).

3. Минимальное значение параметра корреляции κ – число взаимных каналов между независимыми путями. Два полностью независимых пути, но имеющие связность друг с другом, будут создавать взаимные помехи из-за широкоспассательной природы радиоканала. На рис. 2.41 представлены значения κ для двух путей P_1 и P_2 при различных структурах сети. При $\kappa = 0$ пути полностью независимы. В зависимости от количества используемых каналов в сети данный параметр может принимать различное значение: в многоканальной сети κ может быть ограничен некоторой константой, в случае одноканальной сети желательно, чтобы $\kappa = 0$.

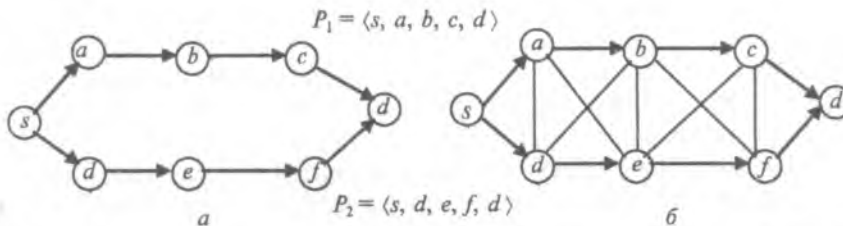


Рис. 2.41. Значения параметра корреляции при различных структурах сети: $a - \kappa = 0$; $b - \kappa = 7$

На сегодня предложены многопутевые версии для ряда рассмотренных ранее методов маршрутизации [57, 58]. 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.

Метод 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 принятых ранее). Основным недостатком SMR – это значительный рост служебного трафика.

Рассмотрим *метод многопутевой маршрутизации* [57, 58]. Представим сеть ненаправленным графом $G = (V, E)$, где $|V|$ – множество узлов, а $|E|$ – множество

двухнаправленных каналов. Каждый узел имеет идентификационный номер. Рассмотрим решение задачи многопутевой маршрутизации на примере метода DSR. Введем следующие обозначения. Путь P_i между узлами v_1 и v_n представляет собой возрастающую последовательность узлов $\langle v_1, \dots, v_i, \dots, v_n \rangle$, таких, что каждый канал $(v_{i-1}, v_i) \in E$. Узел v_i называется промежуточным узлом, если $1 < i < n$. Узлы v_1 и v_n находятся в отдельных подсетях, если между ними не существует пути.

Ориентированным (корневым) деревом назовем ориентированный граф $G' \subseteq G$, в котором дерево с корнем в узле-источнике (узел s) содержит все узлы V . Ориентированное дерево имеет одно из свойств: для каждого узла существует единственный путь, ведущий в этот узел из корня. Подграф графа G' , порожденный множеством, состоящим из узла u и всех его потомков, будем называть поддеревом с корнем в u .

Предварительно используем две теоремы, решающие правила которых будут использоваться для построения независимых маршрутов.

Теорема 2.1. В сети используется зондовый метод маршрутизации DSR. Если после приема и обработки зондов-запросов адресатом d от отправителя s получено два пути $P_1 = \langle s, v_1, \dots, v_n, d \rangle$ и $P_2 = \langle s, u_1, \dots, u_m, d \rangle$ с общими k -узлами ($k < m$ и $k < n$), то тогда будем иметь $v_1 = u_1, v_2 = u_2, \dots, v_k = u_k$.

Из данной теоремы следует, что если адресат принял зонды-запросы с отсутствием независимых маршрутов по узлам, то это означает, что данные маршруты имеют общие узлы в начале маршрута. Поэтому объединение всех маршрутов, принятых адресатом, будет частью ориентированного дерева с корнем в отправителе (если не считать последней ретрансляции). Заметим, что теорема верна для любого узла, который достигим, от отправителя.

Теорема 2.2. Если для ориентированного дерева с корнем в узле s узлы v и u принадлежат различным поддеревьям и существует направленный канал между ними, то, по крайней мере, два независимых пути по узлам существуют между узлом v (или u) и узлом s .

Для реализации метода многопутевой маршрутизации (МММ) используем правила, полученные из приведенных теорем (рис. 2.42).

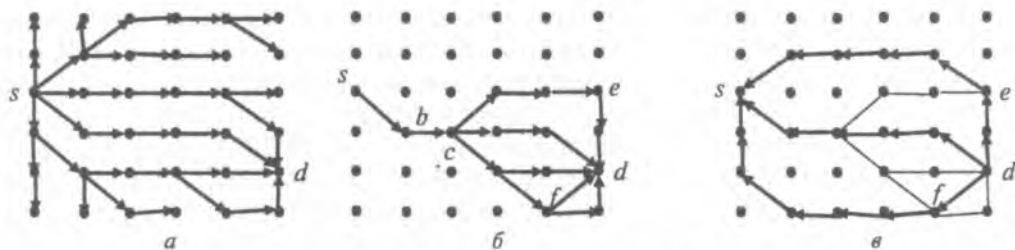


Рис. 2.42. Иллюстрация этапа построения маршрута: а – последовательность приема первого ЗЗ; б – полученное адресатом поддерево маршрутов; в – перенаправление ЗО адресатом и узлами маршрутного поддерева

Этап построения маршрутов.

1. Отправитель s (при необходимости построения α -независимых маршрутов передачи с узлом-адресатом d) широковещательно передает зонд-запрос с признаком многопутевой маршрутизации ($F=1$) и значениями α и Δh .

2. Промежуточный узел i , приняв в первый раз зонд-запрос (33) со значением $F=1$, осуществляет прием всех последующих ЗЗ и их обработку (а не уничтожает их, как в DSR), т.е. записывает в свой кеш все полученные маршруты в направлении отправителя.

3. Адресат d после приема первого ЗЗ посылает отправителю зонд-ответ (ЗО). Затем осуществляет прием (определенное время) остальных ЗЗ и производит их анализ. Если получены маршруты, удовлетворяющие условиям, то узел передает зонды-ответы по обратному маршруту прохождения соответствующих зондов-запросов; иначе – адресат анализирует маршруты, имеющие $1, \dots, k$ общих узлов. При их наличии узел направляет ЗО k -узлам с флагом $P=1$ (перенаправить зонд);

4. Промежуточный узел k , получив ЗО с флагом $P=1$, анализирует содержимое своего кеша и осуществляет поиск независимых путей. При их наличии ЗО направляется адресату. Для построения отправителем независимых маршрутов передачи каждый промежуточный узел включает в ЗО список соседних узлов.

5. Узел-отправитель s принимает ЗО и формирует многопутевые маршруты в два этапа: формирует области компромиссов (области оптимальных решений) – m маршрутов и находит оптимальный (рациональный) вариант в этой области в соответствии с обобщенным показателем $\Xi C_{\eta}(m) = \sum_{\eta=1}^n w_{\eta}^{\xi} c_{\eta}$ (например, $\Xi C_{\eta}(m) = w_1^{\xi} m +$

$+ w_2^{\xi} k + w_3^{\xi} t_c + w_4^{\xi} \Delta h$), где w_i^{ξ} – весовые коэффициенты, определяемые требованиями по передаче ξ -типа информации.

Этап передачи информации по нескольким путям. Отправитель формирует множество допустимых путей доставки $m \in M$, распределяет сообщение $D - D_j$ на блоки d_{ij} в соответствии с требованиями и передает их по маршрутам. Если весь объем информации передан, то этап закончить, иначе – $j = j + 1$, повторить этап построения маршрутов и передачи информации.

Связная сложность предложенного метода равна $O(V + Mh_{\max})$, где $|V|$ – общее число узлов сети; M – число независимых маршрутов ($M \leq N_s$ – число соседей отправителя); h_{\max} – максимально допустимая длина пути. Временная сложность – $O(2h_{\max})$.

Таким образом, рассмотренный метод многопутевой маршрутизации позволяет строить несколько маршрутов передачи информации по заданным требованиям: числу независимых путей передачи, длине маршрута, числу взаимных каналов. Применение данного метода позволит повысить надежность доставки информации, равномернее загрузить узлы сети, уменьшить среднее время задержки передачи сообщений и объем служебной информации на 15–20 % по сравнению с однопутевой маршрутизацией.

2.7. Маршрутизация интегрального трафика

Рассмотренные ранее методы маршрутизации [15] не предполагают построение маршрутов с заданным качеством обслуживания (QoS — quality of service) [1–3], хотя существующий трафик неоднородный и требует заранее определенных параметров маршрута. Например, компьютерный трафик может быть вызван приложениями реального времени, он характеризуется высоким коэффициентом пульсаций (отношение максимальной мгновенной интенсивности трафика к его средней интенсивности), чувствителен к потерям. Мультимедийный трафик (речь, изображение, видеоконференция) требует значительной полосы частот, характеризуется низким коэффициентом пульсаций и низкой чувствительностью к потерям данным. Термин QoS возник в сети ATM (Asynchronous Transfer Mode) и обычно подразумевает набор параметров (пропускная способность, задержка доставки пакетов, вероятность его потери, буферное пространство и др.) для определенного потока данных. Наиболее важными параметрами являются первые два, и они используются для построения маршрутов с заданной пропускной способностью или задержкой. Поэтому возникает задача маршрутизации различных видов трафика с заданным качеством обслуживания [59].

Рассмотрим *метод маршрутизации интегрального трафика*. Возьмем реализацию QoS-маршрутизации для зондовых методов маршрутизации. Функционирование зондовых методов маршрутизации включает два основных этапа: построение и поддержание маршрута. Пропускная способность канала в терминах TDMA означает число необходимых слотов передачи. Математическая постановка задачи нахождения маршрута p заданной пропускной способности W_0 может быть определена следующим образом.

Математическая постановка задачи. Сеть представляется графом $G = (V, E)$, где V — множество узлов; E — множество каналов. Протокол доступа к каналу — TDMA/CDMA. Используется дуплексная передача с временным разделением каналов (TDD). Пропускная способность разделена на множество слотов $S = \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$, составляющих фрейм. Предполагается, что каждый узел знает свободные слоты своих соседей. Возможность резервирования множества слотов $\{RS_i\}$ на передачу определяется множеством свободных слотов $\{SS_i\}$ ($RS_i \subseteq SS_i$). Необходимая пропускная способность маршрута $p = (v_1, \dots, v_i, \dots, v_n)$, $i = \overline{1, n}$, $(v_i, v_{i+1}) \in E$, может быть определена как $W_0 = |RS_i|$. В зависимости от способа принятия решения о резервировании слотов при построении маршрута целевая функция примет следующий вид:

первый способ — резервирование слотов промежуточным узлом при каждой ретрансляции зонда-запроса:

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

второй способ – резервирование адресатом:

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

Каждый из способов имеет свои преимущества и недостатки. Преимуществом первого способа является быстрое получение решения; недостатком – негарантирование построения маршрута даже при его наличии. Второй способ устраняет недостаток первого, однако увеличивает размер зондов и требует большей производительности процессора. Рассмотрим примеры резервирования маршрута с двумя слотами для передачи при первом и втором способах (рис. 2.43).

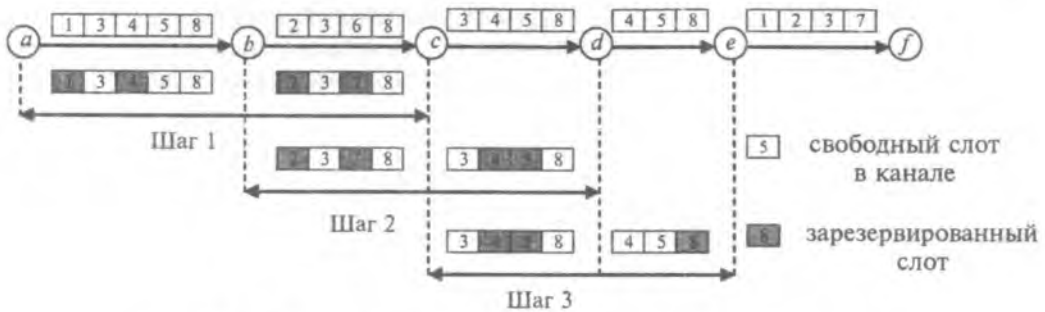


Рис. 2.43. Пример резервирования слотов при каждой ретрансляции

На первом шаге узел *a* резервирует слоты {1,4} и {2,7} и передает 33 узлу *b*; на втором – узел *b* резервирует слоты {4,5}. Однако на третьем шаге узлу *d* остается для резервирования только один слот {8} и узел *d* стирает 33. Таким образом, выделение двух слотов на маршруте (*a, b, c, d, e, f*) данным способом невозможно.

Однако решение этой задачи возможно при втором способе резервирования (рис. 2.44). Поэтому предлагается в дальнейшем использовать данный способ.

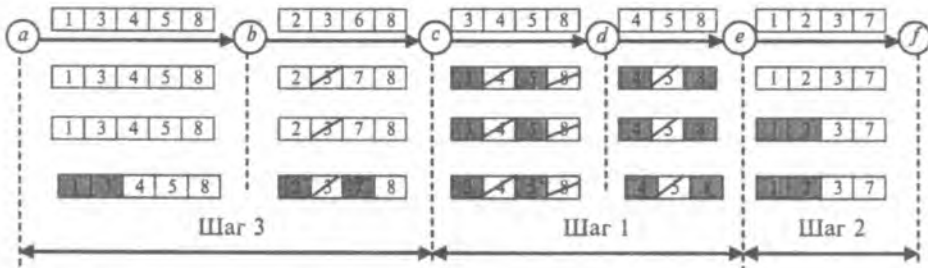


Рис. 2.44. Пример поиска решения по резервированию слотов адресатом

Таким образом, рассмотренный метод маршрутизации позволяет осуществлять построение и поддержание маршрута заданного качества (пропускной способности). Суть метода заключается в резервировании ресурсов узлов в процессе зондового

построения нескольких маршрутов доставки информации. Предложенный метод маршрутизации интегрального трафика имеет высокую эффективность по сравнению с известными QoS-методами маршрутизации.

2.8. Асимметричная маршрутизация

Рассмотренные выше методы маршрутизации для СРС предусматривают функционирование только по двунаправленным каналам. Однако СРС неоднородна (транспортное средство – отдельный мобильный абонент), и узлы сети имеют различную потенциальную мощность передачи. Поэтому в сети будет существовать определенное количество однонаправленных (асимметричных) каналов. Решением задачи маршрутизации в этих условиях может быть отказ от использования однонаправленных каналов и использование только двунаправленных каналов. При этом решении возможны следующие ситуации.

1. Значительное увеличение длины маршрута. Например, для сети, представленной на рис. 2.45, *а*, длина пути от узла *i* к *j* (выраженная числом ретрансляционных участков) при использовании только симметричных каналов равна семи и единице – при асимметричной маршрутизации.

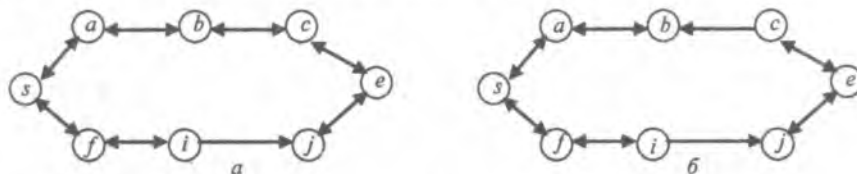


Рис. 2.45. Примеры сетей с асимметричными каналами

2. Отсутствие маршрута в случае наличия в сети значительного количества однонаправленных каналов (см. рис. 2.41, *б*). Решение задачи синтеза метода асимметричной маршрутизации предполагает следующие этапы [60, 61]:

- 1) обнаружение узлом однонаправленных каналов;
- 2) построение альтернативного маршрута, позволяющего замкнуть цикл между узлами в однонаправленном канале;
- 3) туннелирование квитанции и маршрутной информации.

Обнаружение однонаправленных каналов может осуществляться на сетевом уровне. Каждый узел периодически ширококовещательно передает hello-сообщения своим соседям. Данное сообщение содержит список соседних узлов и статус каналов с ними (изначально hello-сообщение содержит только идентификатор узла). Если узел *j* принимает hello-сообщение от узла *i*, не содержащего *j*, то он делает вывод, что канал *i*–*j* является асимметричным и направлен от узла *i* к *j*. Процесс обмена и обработки hello-сообщений позволяет каждому узлу сформировать таблицу соседей с информацией о статусе каналов (двунаправленный или однонаправлен-

ный). Однако о существовании канала $i-j$ не знает узел i . Для информирования его об этом необходимо найти к нему альтернативный маршрут. В простейшем случае обмен hello-сообщениями позволяет построить (при его наличии) альтернативный маршрут длиной в два ретрансляционных участка.

В общем случае построение альтернативного пути зависит от принятого способа построения маршрута: таблично-ориентированного, зондового или гибридного [16]. Рассмотрим возможные решения данной задачи для каждого из способов [61].

1. При таблично-ориентированном методе маршрутизации каждый узел хранит полную или частичную информацию о состоянии сети. Для построения альтернативного маршрута предлагаются ММ с полной информацией о состоянии сети (расширение протокола OSPF, используемого в сети Интернет, для работы по однонаправленным каналам). При данном методе каждый узел хранит граф сети, т.е. размерность маршрутной таблицы $O(N \times N)$, где N — число узлов сети. Соответственно, верхняя граница размеров маршрутных сообщений также ограничена величиной $O(N \times N)$. Обмен содержимым маршрутных таблиц позволяет каждому узлу построить маршруты ко всем остальным узлам сети на основе алгоритма Дейкстры, т.е. есть каждый узел может вычислить кратчайший альтернативный путь. Отличием в протоколах является способ рассылки маршрутной информации (рис. 4.6, а). Недостатком данного подхода является: необходимость распространения состояния каждого канала каждому узлу сети (что изначально предполагает бесконечную длину альтернативного пути). Это приводит к волновой рассылке маршрутной информации. В случае роста размерности сети и динамики топологии данные методы приводят к значительному росту служебного трафика, что неприемлемо для сети с ограниченной пропускной способностью каналов. Кроме того, альтернативный путь ограничен предельной величиной, что может привести к отсутствию маршрута. Таким образом, данные протоколы не приемлемы для СРС с динамической топологией.

2. Функционирование зондовых методов маршрутизации включает два этапа: построение и поддержание маршрута. Для функционирования зондового асимметричного ММ необходимо внести изменения в алгоритм пересылки и обработки зондов. При передаче ЗЗ по однонаправленному каналу данный факт отмечается в зонде единичным значением выделенного бита. Необходимо отметить, что по однонаправленным каналам зонды распространяются быстрее, так как данные каналы образуют узлы с большей мощностью передачи. Поэтому для предотвращения генерации значительного количества маршрутов с однонаправленными каналами узел, принявший зонд по однонаправленному каналу, осуществляет большую задержку до его ретрансляции по сравнению с узлом, получившим зонд по двунаправленному каналу. Адресат, приняв часть зондов-запросов (фактически маршрутов) с информацией о наличии однонаправленных каналов, поступает следующим образом:

а) если $\min h_d < \min h_o$ или $\min h_d - \min h_o < \Delta h$, то используются двунаправленные маршруты, где h_d (h_o) — длина маршрута с двунаправленными (однаправ-

ленными) каналами. Величина Δh зависит от размерности сети, длины кратчайшего маршрута и вида передаваемой информации;

б) если $\min h_d - \min h_o \geq \Delta h$, то принимается решение об использовании однонаправленного маршрута. Кратчайший из маршрутов, состоящий из двунаправленных каналов, выбирается в качестве альтернативного. По нему отправителю сообщается первичный маршрут. Для сокращения длины альтернативного маршрута узлы в первичном пути, имеющие однонаправленные входящие каналы, должны использовать локальное зондирование;

в) если все полученные маршруты содержат однонаправленные каналы, то адресат генерирует рассылку ответных зондов-ответов (пытается найти маршрут с однонаправленными каналами по отношению к отправителю). Зонд-ответ содержит информацию о кратчайшем однонаправленном маршруте к адресату и передается аналогично ЗЗ.

3. Гибридный ММ предусматривает разделение сети на множество пересекающихся R -зон. Каждый узел создает зону R_{M3} (состоит из соседних узлов, расстояние до которых не более R -ретрансляций) и выделяет периферийные узлы своей зоны. Внутри R_{M3} используется табличный метод маршрутизации, за пределами зоны — зондовый. Периферийный узел расположен на расстоянии R от узла, организующего зону, и связан с узлами, находящимися за пределами зоны. Распространение зондов до границы зоны осуществляется не широковещательно, а селективно (по направлению: узел — выбранные периферийные узлы).

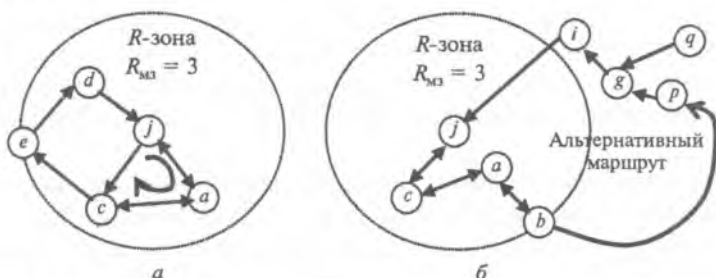


Рис. 2.46. Построение альтернативного маршрута при гибридной маршрутизации

Для реализации асимметричной маршрутизации гибридным методом необходимо рассмотреть варианты построения альтернативных маршрутов. Если однонаправленные каналы образуют цикл внутри зоны или альтернативный маршрут находится внутри зоны, то его обнаружение возможно применяемым табличным ММ. При другой ситуации альтернативный маршрут может находиться за пределами R_{M3} . Например, узел i не может быть в зоне узла j (рис. 2.46, б), так как он не достижим при R ретрансляциях, хотя узел j может знать о существовании i и узлах его зоны — p, g, q . Тогда при необходимости передачи информации от узла j к узлу i узел i по-

сылает через периферийный узел b расширенный зонд-запрос. Формат расширенного зонда-запроса, кроме узла j , содержит адресаты p, g, q . Это позволяет учесть особенности зоновой организации и быстрее найти альтернативный маршрут.

Обнаружение однонаправленных каналов и их использование предполагает совместную работу протоколов канального и сетевого уровней. Существующие протоколы канального доступа (например, протокол IEEE 802.11) предусматривают механизм квитирования, что в условиях асимметричного канала не представляется возможным. В условиях сильно связной сети (что характерно для СРС) существует высокая вероятность наличия альтернативного маршрута. По нему узлу i необходимо сообщить о наличии связности с j (рис. 2.47).



Рис. 2.47. Процесс туннелирования пакетов

Для этой цели предлагается использовать туннелирование пакетов. Туннелирование — это процесс инкапсуляции (внедрения) пакетов протокола канального (нижестоящего) уровня в протокол сетевого (более высокого) уровня. Для уменьшения служебного трафика предлагается туннелировать не все пакеты от адресата к отправителю, а только квитанцию и маршрутные сообщения. На рис. 2.47 узел i посылает пакет узлу j по однонаправленному каналу. Затем узел j строит альтернативный маршрут одним из описанных выше способов. Квитанция и маршрутная информация туннелируются в пакет, передаваемый по альтернативному маршруту от узла j к узлу i . Узел i , приняв пакет (квитанцию), снова передает информацию.

Результаты исследований методов асимметричной маршрутизации показали, что использование асимметричной маршрутизации позволяет в среднем на 10–15 % повысить пропускную способность сети и уменьшить задержку в передаче сообщений. Кроме того, применение методов асимметричной маршрутизации при некоторых топологиях сети является единственно возможным решением для получения маршрута передачи информации.

2.9. Безопасность маршрутизации

Обеспечение безопасности процесса маршрутизации предполагает идентификацию потенциальных атак противника, оценку их угроз и уязвимости используе-

мых протоколов маршрутизации. Уязвимость маршрутизации в СРС 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 [62].

Пассивные атаки осуществляются путем прослушивания радиозфира 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), заикливание маршрутов, создание перегрузки в узлах сети, переполнение маршрутных таблиц, имитация разделения сети на отдельные подсети, увеличение времени доставки сообщений и т. д.

Приведем примеры некоторых других активных атак, которые могут быть осуществлены в СРС.

"Черная дыра". В этом случае противник, используя имеющийся протокол маршрутизации, объявляет себя узлом в кратчайшем пути к адресату и переправляет весь трафик на себя.

"Переполнение маршрутной таблицы". Противник стремится создать маршруты к несуществующим узлам. Цель атаки заключается в создании маршрутов, которые бы предотвратили создание новых маршрутов путем переполнения таблицы маршрутизации.

"Испытание бессонницей". Атака характерна для СРС и направлена на скорейший разряд батарей узлов. Противник может нарушить функционирование энергосберегающих протоколов различных уровней ЭМ ВОС. Кроме того, генерируя ложный информационный и/или служебный трафик (например, генерируя зонды-запросы на построение маршрута к несуществующим узлам), неприятель заставляет узлы расходовать свою энергию батарей.

"Обнаружение местоположения". Противник, используя зондовую маршрутизацию, рассылает зонды-запросы. На основе анализа содержимого зондов-ответов он пытается узнать информацию о местоположении узлов или раскрыть структуру сети.

“Отказ в обслуживании”. Атака направлена на насыщение ресурса сети (связного, вычислительного, по памяти) и может быть реализована на любом уровне ЭМ ВОС: физическом (постановка помех), канальном (повторная передача, захват радиоканала), сетевом (перенаправление маршрутов) и др. Она также может быть направлена на протоколы управления ключами.

Защита от активных атак должна предусматривать аутентификацию и целостность маршрутной информации.

Определим основные требования к безопасной маршрутизации в СРС 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 СРС. Для СРС предложен ряд методов маршрутизации, обеспечивающих некоторые сервисы безопасности [65]: 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 REliableAta Delivery) и др.

Защита от внешних атак включает применение криптографических методов: шифрование информации, использование цифровой подписи и др. Так, цифровая подпись позволяет проверить подлинность, целостность сообщения, а также обеспечить его неопровержимость (обеспечивает защиту от атак типа “отказ”, “подмена и модификация передаваемых данных”). Для обнаружения дубликатов пакетов и соблюдения необходимого порядка их поступления целесообразно использовать в формате пакета временные метки и порядковый номер пакета. Однако криптографические методы не могут обеспечить защиту от воздействия противника при наличии скомпрометированных или захваченных узлов. Для защиты от внутренних атак предполагается использовать системы обнаружения атак IDS (Intrusion Detection System).

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 [62].

2.10. Имитационное моделирование методов маршрутизации

Для СРС предложено использовать множество различных методов маршрутизации. Оценить их эффективность (по критериям $\max S$, $\min \bar{t}_3$, $\min V_{cc}/V_{диск}$ и др.) в условиях высокой динамики изменения топологии сети, случайного характера потоков сообщений, распределенного характера построения маршрутов, многовари-

антности построения самих методов маршрутизации возможно лишь методами имитационного моделирования [63–66]. Эти методы не накладывают никаких ограничений на сложность модели, позволяют учесть в ней любое количество существенных факторов, оказывающих влияние на результат, и решать задачи для любого типа систем без упрощения.

Сущность имитационного моделирования заключается в моделировании процесса маршрутизации при функционировании СРС с помощью вероятностных и детерминированных процедур. Последовательность этих процедур многократно повторяется для статической обработки полученных данных и получения показателей функционирования сети в виде статистических оценок.

Целью разработки имитационной модели (ИМ) является экспериментальное исследование эффективности методов маршрутизации и выбор их оптимальных параметров с точки зрения принятых критериев эффективности. При этом к ИМ предъявляются следующие основные требования: они должны достаточно полно отражать условия функционирования СРС и процесс построения маршрутов в узлах сети на заданном множестве методов маршрутизации (адекватность модели); выходные характеристики, полученные в результате экспериментов, должны обеспечить возможность сравнительной оценки эффективности методов маршрутизации (полезность модели); ИМ должны гарантировать требуемую точность и достоверность результатов моделирования.

Имитационное моделирование включает ряд основных этапов [64].

1. Формулировка проблемы и принятие решения о целесообразности применения метода имитационного моделирования. Определение цели моделирования.

2. Определение релевантных (наиболее существенных) элементов и аспектов функционирования системы и воздействий окружающей среды.

3. Формализация описания ИМ: определяются компоненты модели и соответствующие им переменные и параметры; разрабатывается моделирующий алгоритм, отображающий взаимодействие компонентов между собой и окружающей средой.

4. Программирование имитационной модели на одном из универсальных алгоритмических или специальных имитационных языков. Моделирующий алгоритм оформляется в виде подпрограмм.

5. Планирование эксперимента с целью уменьшения машинного времени, затрачиваемого на получение необходимых данных о поведении ИМ. Оно включает обоснование числа имитационных прогонов и их продолжительности, количества наблюдаемых переменных, последовательности изменения параметров имитационной модели и т.д.

6. Определение начального состояния ИМ, влияющего на достижение моделью равновесия. Это позволяет повысить адекватность функционирования ИМ и исследуемой системы.

7. Подготовка данных о начальных значениях переменных и параметров имитационной модели.

8. Прогон модели на ЭВМ в соответствии с планом имитационного эксперимента.

9. Интерпретация и анализ статистических данных о поведении модели в ходе имитационного эксперимента.

На практике ряд этапов многократно повторяется. Например, в режиме диалога итеративно повторяются этапы 7, 8, 9. В результате модель становится более адекватной исследуемой системе.

В соответствии с постановкой задачи исследований исходными данными имитационной модели выступают параметры СРС и множество методов маршрутизации [16].

Параметрами СРС являются: количество узлов и их характеристики, структура и динамика ее изменений. Каждый узел в сети при его моделировании может быть описан совокупностью параметров, которые разносторонне отражают процесс его функционирования. Входящую нагрузку каждого узла определяют его абоненты. Каждый из них генерирует сообщения различных длин, приоритетов, типов (речь, данные, графика, видео), определяющих различные требования к качеству их обслуживания. В свою очередь узел может быть описан с различных позиций: надежности (интенсивности отказов/восстановления), живучести (интенсивность уничтожения), мобильности (скорость и направление перемещения) и др.

Так, с точки зрения эталонной модели взаимодействия открытых систем узел может моделироваться на физическом, канальном или сетевом уровнях. На физическом уровне параметрами моделирования являются скорость передачи, тип модуляции, выходная мощность передатчика и др. Канальный уровень определяет способ разделения канала (частотный, временной, кодовый), протокол доступа к каналу (случайный, с контролем несущей и т.д.), протокол обмена информацией (число повторных передач, время ожидания квитанции и т.п.). На сетевом уровне определено множество методов управления нагрузкой и методов маршрутизации.

Учесть все перечисленные параметры в модели пока не представляется возможным вследствие недостаточной производительности современных ЭВМ. Поэтому физический уровень узла может быть упрощен (без потери адекватности результатов моделирования) пороговой моделью радиоканала — если расстояние (уровень принимаемого сигнала) между узлами i и j меньше (больше) предельного значения, то существует радиоканал $i-j$ и узлы могут вести информационный обмен.

Модель СРС включает две основные составляющие: модель узла и модель радиоканала. Каждый из них представляется в виде системы массового обслуживания (СМО) [67]. Элементами СМО являются генераторы сообщений, очереди, приборы и многоканальные приборы обслуживания. Один прогон модели заключается в генерировании сообщения (транзакта) в узле-отправителе, его прохождению по сети (элементам СМО) к узлу-адресату в соответствии с протоколами ее функционирования и уничтожению. В это время происходит сбор статистики. Число прогонов определяется необходимой точностью и достоверностью результатов моделирования.

Процесс прохождения пакета от узла i (передающий узел) к узлу j (принимающий узел) показан на рис. 2.48. Каждый узел генерирует сообщения в соответствии со своей входящей нагрузкой. Во входную очередь узла i (длиной $l_{вх}$) поступают сообщения трех типов: информационные (генерируемые абонентом или ретранслируемые), маршрутные (формат, частота генерации определяется конкретным методом маршрутизации) и квитанции. Если входная очередь заполнена, то в соответствии с принятым методом ограничения входной нагрузки сообщение уничтожается ($N_{пис}^{ун}$ — число потерянных информационных сообщений, определяемое принятым методом управления нагрузкой). В приборе ПЦ (процессор узла) осуществляется задержка сообщения на время его обработки $t_{обр}$ (кодирование, шифрование, поиск ретранслятора в маршрутных таблицах и т.п.). Затем сообщение поступает в выходную очередь длиной $l_{вых}$. Прибор ДК, моделирующий протокол доступа к каналу, задерживает сообщение на время ожидания доступа к каналу $t_{дк}$. Далее сообщение занимает передатчик узла i (прибор ПРД — моделирует приемопередатчик), один канал радиосвязи в многоканальном приборе КС (моделирует M -каналов в зоне радиосвязи) и приемник узла j (прибор ПРД) на время передачи $t_{пер}$.

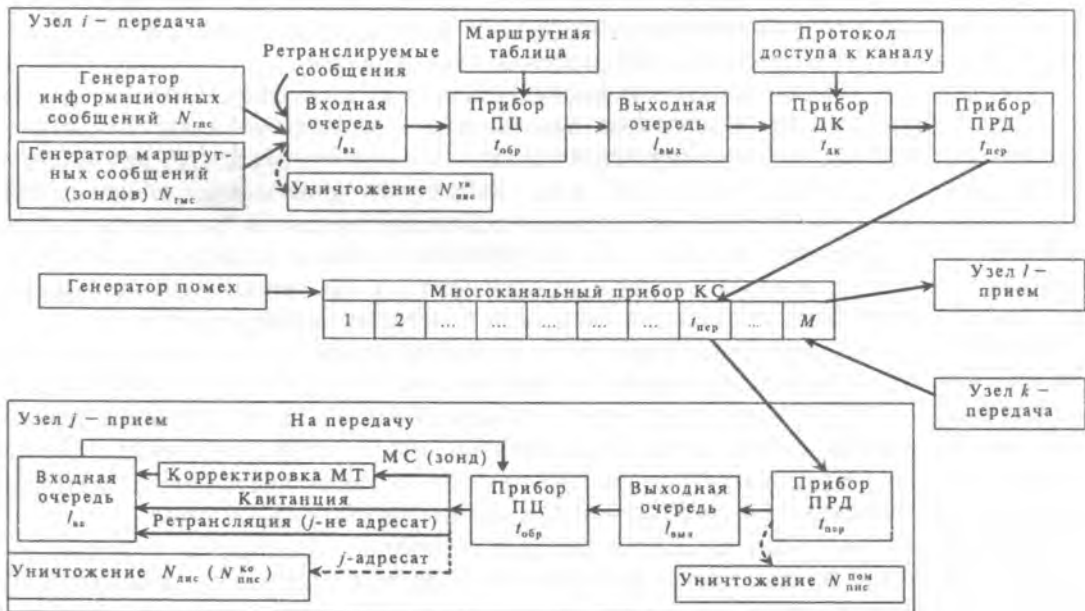


Рис. 2.48. Структура имитационной модели CPC

В процессе передачи по радиоканалу сообщение может быть потеряно (в модели уничтожено) из-за воздействия внутрисистемных помех (влияние протокола доступа к каналу, проблема "скрытого терминала") или помех, создаваемых противни-

ком. Количество потерянных информационных сообщений из-за наличия помех подсчитывается в переменной $N_{\text{пис}}^{\text{пом}}$.

В случае правильного приема сообщения (число ошибок меньше предельной величины) оно поступает в выходную очередь узла j и далее обрабатывается в процессоре (прибор ПЦ). Моделирование процесса маршрутизации включает следующие процедуры: генерацию маршрутных сообщений (зондов), их рассылку, формирование (корректировку) маршрутных таблиц в узлах сети при приеме МС (зондов). Варьируемыми параметрами являются: способ рассылки маршрутных сообщений (зондов) – периодический или событийный; частота генерации маршрутных сообщений (зондов); глубина рассылки маршрутных сообщений (зондов); метрика выбора маршрута (формат маршрутных сообщений, зондов).

Имитационная модель построена по принципу дискретных событий, который, в сравнении с принципом “ Δt ”, позволяет значительно сократить время моделирования, увеличить число прогонов модели и, соответственно, достоверность полученных результатов [66].

В качестве базовых можно выделить следующие события: генерация пакета (информационного, маршрутного) для передачи; занятие и освобождение пакетом процессора узла; занятие и освобождение пакетом приемопередатчика; занятие и освобождение пакетом радиоканала; отказ и восстановление канала радиосвязи; возникновение пика входного трафика и его нормализация и др.

Базовый алгоритм имитационной модели СРС представлен на рис. 2.49. ИМ представляет собой законченный программный продукт, предназначенный для эксплуатации в интерактивном режиме на ПЭВМ под управлением Windows. Пользователю предоставляется возможность визуального наблюдения процесса передачи информации в сети в двух режимах: графическом и текстовом. В графическом режиме отображается положение и перемещение узлов сети, а также процесс обмена информацией между ними. В текстовом режиме предоставляется возможность динамического наблюдения состояния узлов (размеры очередей, содержимое маршрутных таблиц) и каналов радиосвязи.

ИМ разработана на основе системы имитационного моделирования SIMPAS (Simulation of Pascal) [65], которая по своим функциональным возможностям перекрывает систему GPSS [66] и включает набор средств для статистического анализа результатов моделирования. Модель представляет собой совокупность процедур на языке ПАСКАЛЬ. Время моделирования зависит от необходимых значений точности и достоверности результатов. Проведенные эксперименты показали высокую эффективность разработанной модели. Так, например, для сети, состоящей из 30 узлов, время моделирования составило несколько минут при точности моделирования 0,01 с достоверностью 0,95.

К используемым современным системам имитационного моделирования сетей радиосвязи можно отнести OPNET (<http://www.opnet.com/product/modeler/home.html>), GloMoSim, NS-2 (The Networks Simulator <http://www.isi.edu/nsnam/ns>).

В настоящее время наибольшую популярность у исследователей завоевала система NS-2, являющаяся программным обеспечением с открытым кодом. Она включает в себя большое количество готовых программных модулей, реализующих методы маршрутизации, модели нагрузки и мобильности узлов, протоколы канального и физического уровней и других элементов и позволяет оценивать эффективность вновь разрабатываемых методов и алгоритмов управления.

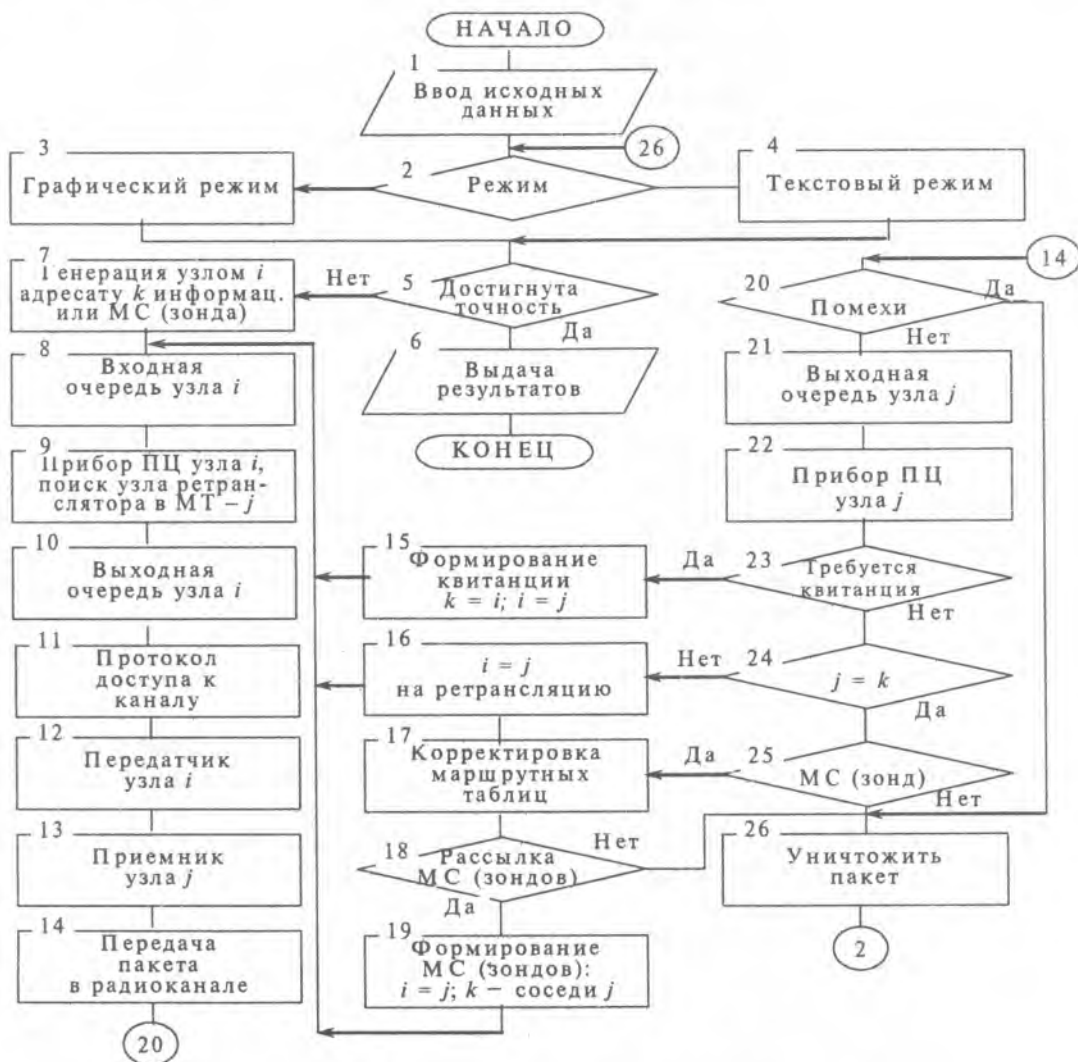


Рис. 2.49. Базовый алгоритм имитационной модели СРС

2.11. Предложения по реализации методов маршрутизации

Для применения в СРС разработано множество методов маршрутизации. Проведенные исследования показали, что каждый из них эффективен (достигается оптимум одного или нескольких показателей эффективности функционирования сети — пропускной способности S , средней задержки передачи сообщения \bar{t}_3 и др.) при определенной ситуации в сети (динамика изменения топологии ν , интенсивность входящего трафика Γ , размерность N и т. д.). Проведенные исследования показали, что при низкой мобильности узлов эффективны таблично-ориентированные методы маршрутизации, при высокой — зондовые методы, при очень высокой — волновой способ передачи. В условиях значительной входной нагрузки предпочтительны табличные методы, низкой — зондовые. В свою очередь, каждый из зондовых методов (DSR, AODV, ABR, SSR и др.) характеризуется своими особенностями построения, поддержания и хранения маршрутов, что и определяет различные диапазоны их эффективного применения [16]. Проведенный анализ методов групповой маршрутизации также продемонстрировал зависимость их эффективности от текущей ситуации в сети: при высокой динамике топологии эффективны групповые маршруты в виде подсети, при низкой динамике — в виде дерева. Таким образом, *единого метода маршрутизации, удовлетворяющего всем перечисленным выше требованиям и обеспечивающего оптимизацию всех показателей эффективности функционирования сети при различных условиях ее работы, не существует.*

Для решения данной проблемы предлагается реализовать так называемую “активную” маршрутизацию, которая предусматривает следующие подходы (в отличие от традиционных методов маршрутизации) [68]:

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

Для реализации перечисленных подходов необходимо создание в каждом узле сети системы оперативного управления маршрутизацией, функции которой можно объединить в следующие относительно независимые группы: сбора информации о состоянии сети, хранения маршрутов, построения маршрутов, поддержания маршрутов, управления топологией, обучения и обеспечения безопасности. Концептуальная модель системы оперативного управления маршрутизацией изображена на рис. 2.50.

Подсистема сбора информации предполагает сбор и хранение информации о сети, зоны сети и каналов согласно принятой модели управления сетью и маршрутизацией в частности.

Подсистема построения маршрута функционирует различными способами. Табличные методы предполагают периодический обмен маршрутными сообщениями между узлами сети и осуществляют построение маршрута. Зондовые методы строят маршрут в три этапа: на первом — волновым способом передаются зонды-

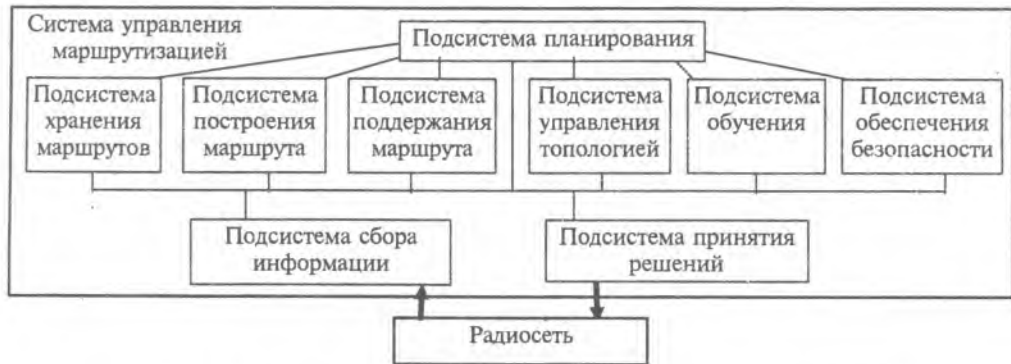


Рис. 2.50. Концептуальная модель системы управления маршрутизацией

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 (зонда-ответа) и глубина зондирования адаптируются к типу передаваемой информации и условиям функционирования сети (зонд-запрос несет информацию о требованиях к строящемуся маршруту).

Подсистема управления топологией осуществляет маршрутизацию пакетов с помощью регулировки мощности передатчика, использованием направленных антенн и селективным выбором ретранслятора.

Подсистема поддержания маршрута может функционировать несколькими способами: пассивным – при отказе канала отправителю посылается сообщение об отказе маршрута; активным – узел прогнозирует состояние существующих каналов в используемых маршрутах и, при необходимости, осуществляет процесс упреждающего построения нового участка маршрута.

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

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

Подсистема обеспечения безопасности предполагает идентификацию атак противника, оценку их угроз и уязвимость используемых протоколов маршрутизации. Она должна обеспечить защиту 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.

Подсистема принятия решения определяет текущую целевую функцию управления, проверяет достижимость данной цели и осуществляет ее реализацию. Ре-

зультатами работы данной подсистемы являются: выбор конкретного метода маршрутизации, формирование формата зонда-запроса на поиск маршрута, глубина сбора информации о состоянии сети, назначение адреса ретранслятора, выбор мощности передачи, упреждающее построение маршрута, отказ в обслуживании (уничтожение пакета) и т.д. Механизм принятия решения может быть представлен от простейших схем ситуационного управления до применения интеллектуальных систем, основанных как на известных способах представления, накопления и преобразования знаний, так и на методах и алгоритмах представления и обработки нечеткой информации и знаний [69–71].

Раскроем подробнее содержание активной маршрутизации.

1. Параллельное функционирование множества ММ и ситуационное управление их применением. Каждый узел сети реализует множество методов маршрутизации $\{MM\} = \{MM_1, MM_2, \dots, MM_n\}$. В зависимости от конкретной ситуации на сети функционирует один из них – MM_j , который обеспечивает сетевую оптимизацию. Проиллюстрируем данный подход на конкретном примере. Предположим, что программное обеспечение каждого узла обеспечивает функционирование трех методов маршрутизации: двух зондовых – DSR, AODV и волнового. Зависимость их эффективности от мобильности узлов выражается следующими правилами: при низком уровне мобильности узлов эффективен метод DSR, при высоком – AODV, очень высоком – волновой. Применение того или иного ММ предполагает оценку каждым узлом ситуации на сети. Изменение топологии сети он может оценить по соотношению объема служебной и полезной информации, проходящей через узел (δ). Для принятия решения о применении конкретного зондового метода используются правила продукционного типа: “ЕСЛИ условие, ТО действие”. Условие описывает применимость правила в зависимости от текущего состояния сети, действие – описывает решение, направленное на сетевую оптимизацию (например, увеличение пропускной способности сети). Для нашего примера: ЕСЛИ $\delta \leq \delta_n$, ТО применять DSR; ЕСЛИ $\delta_n < \delta < \delta_b$, ТО \rightarrow AODV (δ_n, δ_b – нижняя и верхняя границы эффективного применения AODV); ЕСЛИ $\delta \geq \delta_b$, ТО \rightarrow волновой метод. Пороговые значения δ_n, δ_b 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, входящему трафику, плотности размещения узлов и их взаимного расположения, принятых протоколов транспортного и канального уровней и т.п.

2. Динамическое формирование метрик выбора маршрута. Данный подход предполагает активный поиск необходимого маршрута: маршрутное сообщение несет в себе требования к маршруту в виде параметров (метрик) выбора маршрута и программу его обработки.

Большинство предложенных методов маршрутизации использует однопараметрическую маршрутизацию, которая при выборе кратчайшего пути учитывает только один параметр. Однако требования передачи пакета могут выражаться следующими основными параметрами: пропускной способностью, задержкой, числом ретрансляций, вероятностью доставки, безопасностью и др. Эти требования будут определять и требования к маршруту передачи, т.е. необходимо говорить об оптимизации данных параметров или о маршруте с заданным качеством обслуживания (QoS-маршрутизация).

3. Маршрутизация с управлением топологией сети. Для повышения эффективности функционирования СРС функции маршрутизации реализуются на двух уровнях: на верхнем – оперативное управление топологией сети U_T (создание потенциальных маршрутов передачи информации); на нижнем – управление построением и поддержанием маршрутов при полученной топологии U_M (реализация конкретного метода маршрутизации из их совокупности). Предполагается, что каждый узел может изменять мощность передачи p_i и/или направленность антенн β_i . Увеличение p_i уменьшает число ретрансляций и, соответственно, снижает t_3 , однако это приводит к увеличению уровня взаимных помех и уменьшению S . Целью управления топологией является системная ($\max S, \min t_3, \max T_{ж}$) или пользовательская оптимизация. Задача управления топологией СРС сводится к задаче ситуационного управления с правилами продукционного типа. Условие описывает применимость правила в зависимости от текущего состояния (параметров) сети или зоны сети, действие – изменение связности сети, направленное на сетевую или пользовательскую оптимизацию. Все правила, независимо от стратегии, определяют одно из возможных действий – увеличение (уменьшение) мощности передачи узлов и/или изменение направленности антенн, что приводит к увеличению (уменьшению) числа узлов, принимающих данную передачу.

4. Интеллектуализация процессов принятия решений. Рассмотрим архитектуру узла, позволяющую реализовать интеллектуальную маршрутизацию. Она содержит следующие основные блоки: базу данных управления; классификатор; планировщик; блок обучения; базу знаний, интерпретатор. Рассмотрим возложенные на них функции (рис. 2.51).

База данных управления МІВ (Management Information Base) поддерживает в актуальном состоянии модель узла (сети) и может быть формализована следующими основными l -группами признаков.

Классификатор на основе поступающей на его вход информации осуществляет классификацию принимаемых сообщений, идентификацию текущей ситуации и определяет необходимость управляющего воздействия.

Реально-временные модели предназначены для расчета времени существования маршрута на основании моделей распространения радиоволн и рельефа местности, получаемого из электронной карты, характеристик зоны сети (например, пропускной способности), прогнозируемых параметров трафика и т. д.

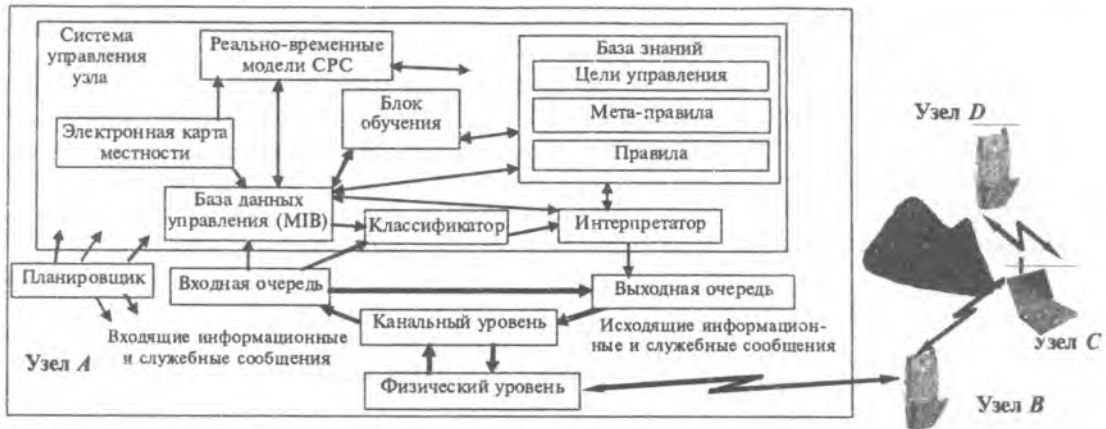


Рис. 2.51. Архитектура интеллектуального узла

База знаний содержит следующую совокупность правил для выработки решений по маршрутизации: определение текущей целевой функции управления, выбор методов и функций маршрутизации, определение формата МИ и др.

Интерпретатор правил выполняет две функции: во-первых, просмотр существующих правил из базы данных и правил из базы знаний и добавление в базу данных новых фактов и, во-вторых, определение порядка просмотра и применения правил. Правила базы знаний работают согласно различным стратегиям. Одни правила обнаруживают перегруженный участок сети и пытаются направить сообщения, минуя его, другие – находят недоиспользованные маршруты и пытаются направить трафик по этим путям, третьи – анализируют топологию сети и пытаются осуществить сетевую оптимизацию. При этом следует различать оптимизацию характеристик сети в целом (зоны сети) или пользовательскую оптимизацию (между парами отправитель–получатель с сохранением некоторого равновесия для всей сети). Поэтому узел может иметь $Z_m^{сет}(t)$, $m = \overline{1, M}$, целей управления сетью (например, $Z_1^{сет}(t)$ – максимизация пропускной способности) и $Z_y^{уз}(t)$, $y = \overline{1, Y}$ целей управления узлом, направленных на пользовательскую оптимизацию. Цели $Z_m^{сет}(t)$ и $Z_y^{уз}(t)$ взаимосвязаны. Выбор той или иной цели управления (постановка цели), как и вывод решения, зависят от ситуации и типа передаваемого сообщения на сети. Иерархия процесса принятия решения по маршрутизации показана на рис. 2.52: анализ состояния узла и сети, определение целевых функций управления, выбор метода маршрутизации, выбор функции маршрутизации, выбор формата маршрутной информации и реализация решения, т.е. процесс вывода решения можно представить в виде взвешенного графа переходов по ситуациям в зависимости от исходной и целевой ситуаций. Фактически 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, построение маршрута и передача входящего пакета согласно маршрутным таблицам) активная маршрутизация позволяет осуществлять сетевую и пользовательскую оптимизацию за счет адаптации к текущей ситуации в сети, учета требований к передаче определенных типов, а также повышения уровня обоснованности принимаемых маршрутных решений.

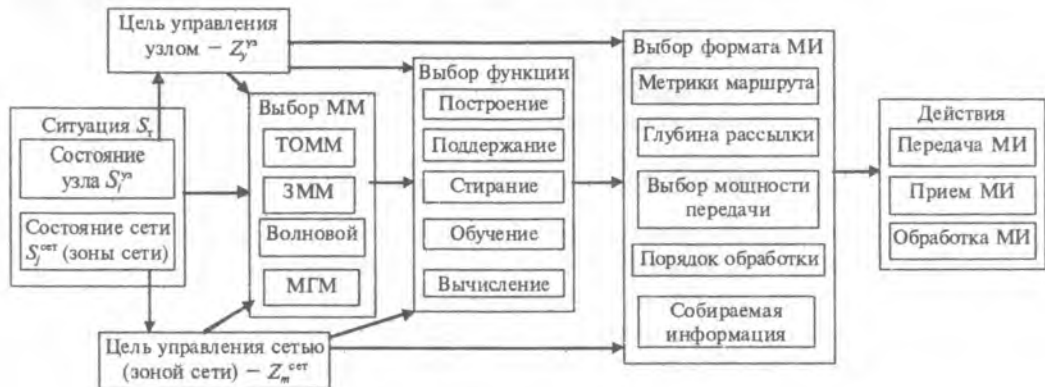


Рис. 2.52. Иерархия принятия решения по маршрутизации

2.12. Выводы

В данной главе выполнен сравнительный анализ методов (протоколов) маршрутизации, предложены методика оценки их эффективности и архитектурное решение сетевого уровня СРС. При этом получены следующие научные и практические результаты.

1. Существующие протоколы маршрутизации, применяемые в стационарных сетях связи (OSPF, RIP, IGRP и др.), не могут быть применены в СРС вследствие низкой адаптации к изменению динамики топологии сети и необходимости передачи значительных объемов служебной информации. Разрабатываемые методы маршрутизации должны соответствовать условиям построения и функционирования конкретных СРС и стремиться удовлетворить обязательные (опционные) требования: распределенное функционирование; минимальная загрузка сети служебной информацией; быстрая сходимость; отсутствие заикливания маршрутов; получение маршрута по мере необходимости; обеспечение нескольких маршрутов доставки информации к адресату; обеспечение маршрутов заданного качества; обеспечение режима "молчания" в случае необходимости; поддержка однонаправленных кана-

лов, минимизация мощности передач узлов при их оснащении аккумуляторными батареями, безопасность процессов маршрутизации.

2. Проведен анализ построения и функционирования таблично-ориентированных, зондовых и гибридных методов маршрутизации в СРС.

Табличные методы требуют решения проблемы сходимости и гарантии отсутствия заикливания маршрутов. Они постоянно строят и поддерживают маршруты к адресату, внося при этом значительный служебный трафик. Данные методы при небольшой мобильности узлов имеют большую пропускную способность (отсутствует задержка в построении маршрута) в сравнении с зондовыми методами.

Зондовыми методами обеспечивается высокая оперативность адаптации к изменению топологии сети, гарантируется отсутствие заикливания маршрутов, обеспечивается получение маршрута по мере необходимости, строятся несколько маршрутов к адресату. При высокой мобильности и незначительной нагрузке эффективнее зондовые методы. Однако зондовые методы обладают инерционностью в построении маршрута, вызывают значительный служебный трафик при увеличении числа пар отправитель—адресат. Нами предложены способы минимизации объема служебного трафика и уменьшения времени построения маршрута.

Гибридный метод минимизирует рассылку служебной информации за счет адаптации каждым узлом сети размеров маршрутной зоны. Внутри маршрутной зоны поддержка маршрутов осуществляется согласно алгоритму функционирования табличного метода маршрутизации, за пределами маршрутной зоны — зондового метода.

3. Предложена методика оценки эффективности функционирования методов маршрутизации в СРС. Показателями эффективности методов маршрутизации являются следующие параметры: локальные (связная, временная и вычислительная сложность метода) и глобальные (пропускная способность сети, среднее время задержки передачи пакетов, соотношение объема переданной служебной информации и объема полезной). Оценку эффективности методов маршрутизации предлагается осуществлять в два этапа: на первом — провести выбор лучших методов по локальным характеристикам из различных классов, а на втором — исследовать методы маршрутизации по глобальным характеристикам и проанализировать их эффективность.

4. Рассмотрена совокупность методов и алгоритмов передачи многоадресной информации — методы групповой маршрутизации и волновые алгоритмы передачи информации в СРС. Методы групповой маршрутизации оптимизируют сетевые характеристики (пропускную способность, среднее время доставки сообщений) при передаче групповой информации в СРС с динамичной топологией.

Результаты проведенного имитационного моделирования групповых методов маршрутизации показали, что для СРС с динамичной топологией необходимо: использовать групповой маршрут в виде дерева, осуществлять локальное зондирование, оптимизировать период рассылки служебных сообщений. Это позволяет

уменьшить служебный трафик на 5–30 % при снижении среднего времени задержки передачи пакетов в среднем на 10 %.

При высокой мобильности узлов или значительном количестве получателей целесообразно применять волновой способ передачи информации. Нами проведен анализ адаптивных волновых алгоритмов. Применение данных волновых алгоритмов позволяет минимизировать число передач пакета при различных условиях функционирования сети.

5. Для СРС большой размерности (сотни и тысячи узлов) рассмотрена иерархическая маршрутизация. Предложены новые критерии и алгоритм кластеризации сети, способы внутрizonовой и межzоновой маршрутизации сообщений, решена проблема адресации за счет введения динамической иерархической адресации мобильных абонентов и логического разделения подсетей по функциональному признаку. Применение иерархической маршрутизации позволяет “стабилизировать” изменения топологии, многократно использовать частотный (кодовый) ресурс и обеспечивать минимизацию служебного трафика в динамичных сетях большой размерности.

6. Для реальных условий функционирования СРС предложена совокупность многопараметрических методов, обеспечивающих пользовательскую оптимизацию.

Метод многопутевой маршрутизации в условиях низкой надежности (безопасности) радиоканалов позволяет строить несколько маршрутов передачи в СРС по заданным параметрам: числу независимых путей передачи, длине маршрута, числу взаимных каналов. Метод повышает надежность доставки информации, уменьшает время доставки информации и объем служебной информации.

Метод маршрутизации интегрального трафика позволяет обеспечить построение и поддержание маршрутов заданного качества для передачи различных типов информации (речь, видео, графика и т.д.) в СРС. Особенностью метода является резервирование ресурсов узлов сети на этапах построения и поддержания нескольких путей передачи информации зондовым способом маршрутизации.

Рассмотрен метод асимметричной маршрутизации, который обеспечивает оптимизацию сетевых характеристик в условиях асимметрии каналов в СРС. Он включает три этапа функционирования: обнаружение однонаправленных каналов, построение альтернативного маршрута, туннелирование квитанции и маршрутной информации.

7. Предложен новый подход (“активная” маршрутизация), предполагающий: функционирование в сети множества методов маршрутизации; динамическое формирование метрик выбора маршрута; управление топологией сети как составной частью маршрутизации; интеллектуализацию процессов принятия решения по маршрутизации. “Активная” маршрутизация позволяет осуществлять сетевую и пользовательскую оптимизацию за счет адаптации к текущей ситуации на сети, типу передаваемой информации и повышения уровня обоснованности принимаемых маршрутных решений.

Список литературы

1. *Олифер В.Г.* Компьютерные сети. — СПб.: Питер, 2000. — 672 с.
2. *Кульгин М.* Технология корпоративных сетей. Энциклопедия. — СПб.: Питер, 2000. — 704 с.
3. *Мельников Д.А.* Информационные процессы в компьютерных сетях. Протоколы, стандарты, интерфейсы, модели. — М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 1999. — 256 с.
4. *Шварц М.* Сети связи: протоколы, проектирование и анализ / Пер. с англ. — М.: Наука, 1992. — 336 с.
5. *Дилип Н.* Стандарты и протоколы Интернета / Пер. с англ. — М.: ТОО "Channel Trading Ltd", 1999. — 384 с.
6. *Мизин И.А., Богатырев В.А., Кулешов А.П.* Сети коммутации пакетов. — М.: Радио и связь, 1986. — 408 с.
7. *Советов Б.Я., Яковлев С.А.* Построение сетей интегрального обслуживания. — Л.: Машиностроение, 1990. — 332 с.
8. *Бертсекас Д., Галлагер Р.* Сети передачи данных / Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 544 с.
9. *Щербина Л.П.* Основы теории сетей военной связи. — Л.: ВАС, 1989. — 178 с.
10. *Арипов М.Н.* Контроль и управление в сетях передачи данных с коммутацией пакетов / Арипов М.Н., Присяжнюк С.П., Шарипов Р.А. — Ташкент: Фан, 1988. — 160 с.
11. *Шаров А.Н.* Автоматизированные сети радиосвязи / Шаров А.Н. — Л.: ВАС, 1988. — 178 с.
12. *Куо Ф.Ф.* Протоколы и методы управления в сетях передачи данных / Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1985. — 480 с.
13. *Джубин Д., Торноу Д.* Протоколы пакетной радиосети DARPA // ТИИЭР. — 1987. — 75, № 1. — С. 26–41.
14. Офіційний сайт Internet Engineering Task Force (IETF). Mobile Ad Hoc Networks (MANET) Working Group Charter. — Режим доступу: <http://www.ietf.org/html/charters/manet-charter.html>
15. *Шиллер Й.* Мобильные коммуникации / Пер. с англ. — М.: Изд. дом "Вильямс", 2002. — 384 с.
16. *Минович А.И., Романюк В.А.* Маршрутизация в мобильных радиосетях — проблема и пути ее решения // Зв'язок. — 2006. — № 3. — С. 42–50.
17. *Романюк В.А.* Постановка проблеми маршрутизації інформаційних потоків у мережах радіозв'язку з динамічною топологією // Зб. наук. праць ВІТІ НТУУ "КПІ", 2003. — № 1. — С. 112–119.
18. *Минович А.И., Романюк В.А.* Управление топологией в мобильных радиосетях // Зв'язок. — 2003. — № 2.
19. *Qayum A., Viennot L., Laoviti P.* Optimized Link State Routing // Proc. of IEEE INMIC. — 2001. — P. 1120–1125.
20. *Perkins C.E., Bhagwat P.* Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers // Comp. Commun. Rev. — 1994. — N 10. — P. 234–244.

21. Романюк В.А. Управление построением маршрутов для сети с динамической топологией // Управляющие системы и машины. – 1993. – № 2. – С. 81–86.
22. Миночкин А.И., Романюк В.А. Маршрутизация в мобильных радиосетях // Сети и телекоммуникации. – 2002. – № 1. – С. 42–47.
23. Красиловец Л.В., Романюк В.А. Проблемы управления сетями пакетной радиосвязи с промежуточным хранением информации и мобильными абонентами // Кибернетика и системный анализ. – 1996. – № 5.
24. Johnson D.B., Maltz D.A. Dynamic Source Routing in Ad-Hoc Wireless Networks // Mobile Computing. – 1996. – P. 153–181.
25. Perkins C.E., Royer E.M. Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing // Proc. of IEEE WMCSA' 99. – 1999. – P. 90–100.
26. Toh C.-K. A Novel Distributed Routing Protocol To Support Ad-Hoc Mobile Computing // Proc. IEEE Annual Int. Phoenix Conference Computer and Communications. – 1996. – N 3. – P. 480–486.
27. Dube R. Signal Stability Based Adaptive Routing (SSA) for Ad-Hoc Mobile Networks // IEEE Personal Communication. – 1997. – N 2. – P. 36–45.
28. Park V., Corson M.S. A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks // Proc. IEEE INFOCOM' 97. – 1997. – N 4. – P. 451–458.
29. 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.
30. Міночкін А.І., Романюк В.А. Імітаційне моделювання методів маршрутизації, які застосовуються в автоматизованих мережах радіозв'язку // Зб. наук. праць. – К.: КВІУЗ. – 2001. – № 1. – С. 95–102.
31. 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 // Proc. ACM/IEEE MOBICOM. – 1998. – P. 85–97.
32. Perkins C.E., Royer E.M., Das S.M. Performance Comparison of Two On-Demand Routing Protocols for Ad Hoc Networks // IEEE Personal Computer. – 2001. – 8, N 2. – P. 16–28.
33. Lee S., Gerlof M. A Simulation Study of Table-Driven and On-Demand Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks // IEEE Network. – 1999. – 13, N 4. – P. 48–54.
34. Романюк В.А. R-зонный метод маршрутизации в автоматизованных сетях радиозв'язку // Зб. наук. праць. – 2001, № 3. – С. 182–186.
35. Романюк В.А. Групповая маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2001. – № 6. – С. 36–41.
36. Wu C.M., Tay Y.C. AMRIS: A Multicast Protocol for Ad-hoc Wireless Networks // Proc. of IEEE MILCOM' 99. – 1999. – P. 25–29.
37. Rouer E.M., Perkins C.E. Multicast Operation of the On-Demand Distance Vector Routing Protocol // Proc. of ACM/IEEE MOBICOM. – 1999. – P. 207–218.
38. Botmaiah E., Liu M., McAuley A., Talpade R. AMRoute: Ad-hoc Multicast Routing Protocol // Internet-Draft. – 1998. – P. 459–463.

39. Lee S.-J., Gerla M., Chiang C.-C. On-Demand Multicast Routing Protocol // Proc. of IEEE WCNC' 99. – 1999. – P. 1298–1304.
40. Garcia-Luna-Aceves J.J., Madruga E.L. A Multicast Routing Protocol for Ad-Hoc Networks // IEEE INFOCOM' 99. – 1999. – P. 784–792.
41. Емельянов В.А., Мельников О.И., Сарванов В.И. Лекции по теории графов. – М.: Наука, 1990. – 384 с.
42. Романюк В.А. Активная маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – № 3. – 2002. – С. 21–25.
43. Lee S.-J., Su W., Gerla M., Bagrodia R. A Performance Comparison Study of Ad-Hoc Wireless Multicast Protocols // Proc. of IEEE INFOCOM. – 2000. – P. 565–574.
44. Романюк В.А. Волновая маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2003. – № 4. – С. 44–46.
45. Ni S.-Y., Tseng Y.-C., Chen Y.-S., Sheu J.-P. The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network // Proc. of ACM/IEEE MOBICOM' 99. – 1999. – P. 151–162.
46. Haas Z., Halpern J.Y., Li L. Gossip-Based Ad Hoc Routing // Proc. of IEEE INFOCOM. – 2002. – P. 785–791.
47. Galinescu G., Mandoiu I., Wan P.-J., Zelikovsky A. Selecting Forwarding Neighbors in Wireless Ad Hoc Networks // Proc. of DIAM. – 2001. – P. 34–43.
48. Sun M.-T., Lai T.-H. Computing Optimal Local Cover Set Broadcast in Ad Hoc Networks // Proc. of IEEE ICC. – 2002. – P. 369–374.
49. Андрианов В.И., Соколов А.В. Средства мобильной связи. – СПб.: ВHV, 1998. – 256 с.
50. Громаков Ю.А. Стандарты и системы подвижной связи. – М.: Эко ТрейнзКо, 1997. – 238 с.
51. Невдяев Л.М. Мобильная связь 3-го поколения. – М.: МЦНТИ, 2000. – 208 с.
52. Шахам Н., Уэсткотт Д. Тенденции развития архитектуры и протоколов систем пакетной радиосвязи // ТИИЭР. – 1987. – № 1. – С. 100–119.
53. Gupta P., Kumar P.R. The Capacity of Wireless Networks // IEEE Transactions on Information Theory. – 2000. – IT-46, N 2. – P. 388–404.
54. Романюк В.А. Иерархическая маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2002. – № 1. – С. 38–42.
55. Gerla M., Lin C.R. Adaptive clustering for mobile wireless networks // J. on Selected Areas in Communications. – 1997. – 17, N 7. – P. 1265–1275.
56. Эфремидес Э., Уизелтур Д.Э., Бейкер Д.Д. Вопросы проектирования надежных мобильных радиосетей, использующих методы передачи и приема сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты // ТИИЭР. – 1987. – 75, № 1. – С. 68–90.
57. Миночкин А.И., Романюк В.А. Многопутевая маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2004. – № 6. – С. 23–25.
58. Wang I., Zhang I., Shy Y., Dong S. Adaptive Multipath Source Routing in Ad Hoc Networks // Proc. IEEE ICC. – 2001. – 3. – P. 867–871.

59. Романюк В.А. Маршрутизация интегрального трафика в мобильных радиосетях / Романюк В.А. // Зв'язок. – 2002. – № 2. – С. 24–27.
60. Романюк В.А. Асимметричная маршрутизация в мобильных радиосетях MANET // Там же. – 2003. – № 3. – С. 28–30.
61. Bao L., Garcia-Luna-Aceves J.J. Link-State Routing with Unidirectional Links // Proc. International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN). – 1999. – P. 358–363.
62. Міночкін А.І., Романюк В.А., Шаціло П.В. Виявлення атак в мобільних радіомережах // 36. наук. праць ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2005, № 1. – С. 102–111.
63. Иващенко А.В., Сыпченко Р.П. Основы моделирования сложных систем на ЭВМ. – Л.: ЛВИУС, 1988. – 135 с.
64. Гультяев А.К. MATLAB 5.3. Имитационное моделирование в среде Windows. – СПб.: КОРОНА-принт, 2001. – 400 с.
65. Марков А.А. Моделирование информационно-вычислительных процессов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 360 с.
66. Шрайбер Т.Дж. Моделирование на GPSS / Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1980. – 569 с.
67. Міночкін А.І., Романюк В.А. Імітаційне моделювання та аналіз мобільних радіомереж // 36. наук. праць ВІТІ НТУУ “КПІ”, 2003. – № 3. – С. 28–33.
68. Романюк В.А., Сова О.Я., Жук П.В. Интеллектуальная маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2011. – № 2. – С. 24–31.
69. Герасимов Б.М., Грабовский Г.Г., Рюмишин Н.А. Нечеткие множества в задачах проектирования, управления и обработки информации. – К.: Техника, 2002. – 140 с.
70. Миночкин А.И., Романюк В.А. Методология оперативного управления мобильными радиосетями // Зв'язок. – 2005. – № 2. – С. 53–58.
71. Міночкін А.І., Романюк В.А. Методи прийняття рішень системою управління мобільною радіомережею // 36. наук. праць ВІТІ НТУУ “КПІ”, 2006. – № 1. – С. 66–71.

ГЛАВА 5

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ САМООРГАНИЗУЮЩИМИСЯ РАДИОСЕТЯМИ

5.1. Особенности управления самоорганизующимися радиосетями

Напомним, что самоорганизующиеся радиосети характеризуются динамической топологией, ограниченной энергетической возможностью узлов, оснащенных батареями, различной размерностью (десятки, сотни и тысячи узлов); неоднородностью по мощности передачи и мобильности узлов, ограниченной безопасностью из-за широкополосной природы радиоканала и пр. Узлы данной сети должны быстро адаптироваться к частым изменениям топологии и эффективно использовать ограниченные сетевые ресурсы. В таких условиях невозможно обеспечить информационный обмен с заданным качеством невозможно без эффективной системы управления (СУ) сетью.

Анализу и синтезу методов управления сетями связи посвящено значительное количество работ [1–8]. Однако, как видно из этих работ, существующие современные технологии управления телекоммуникационными сетями рассчитаны на статичные или квазистатичные условия их функционирования и не учитывают особенности СРС. Например, технология TNM (Telecommunication Networks Management) является централизованной, для управления телекоммуникационной сетью используется выделенная сеть управления, построенная на технологии агент-менеджер с низкой степенью автоматизации процессов управления.

В то же время основными отличиями систем управления СРС от стационарных сетей являются [9]:

- различные цели управления, требования к качеству и оперативности принимаемых решений – управление СРС имеет более сложные задачи и жесткие требования к оперативности и качеству принимаемых решений;
- различная архитектура систем управления сетями – архитектура системы управления СРС должна реализовывать полностью децентрализованное (распределенное) управление;

- отсутствие выделенной сети передачи управляющей информации.

Особенности системы управления СРС – это:

- многомерность, обусловленная большим количеством подсистем, элементов и связей между ними;
- многопараметричность, определяемая разнообразием целей отдельных подсистем, разнообразием их характеристик, требований и показателей эффективности;
- многофункциональность и иерархичность, вытекающая из необходимости решения различных задач управления на различных уровнях и этапах функционирования системы;
- сильная зависимость характера функционирования от параметров СРС и внешних воздействий.

В то же время к системе управления СРС предъявляются следующие основные требования: обеспечение передачи различных типов трафика с заданным качеством; обеспечение адаптивного и распределенного функционирования сети с возможностью ее самоорганизации; принятие решений в реальном или близком к реальному масштабу времени; минимальная загрузка сети служебной информацией; оптимизация характеристик сети; максимальная автоматизация процессов управления сетью.

В [9] определены основные принципы управления СРС, к которым можно отнести: адаптивность, функциональность, распределенность, координацию взаимодействия, иерархичность, оптимальность и автоматизацию.

Исследование системы управления СРС представляет собой исключительно сложную задачу. Однако объединение функций в относительно независимые группы позволяет проводить декомпозицию управления сетью на подсистемы, что значительно упрощает разработку математического обеспечения. Системой оперативного управления реализуется ряд функций, которые можно объединить в относительно независимые группы. На рис. 5.1 представлена функциональная модель системы оперативного управления сетью с выделением следующих основных подсистем [9]: контроля, сбора и хранения информации о состоянии сети, выработки решений (по топологии, маршрутизации и т.д.) и реализации решений.

С позиций системного подхода управление должно быть направлено на достижение определенной цели. В условиях динамики топологии, случайного характера циркулирующих потоков данных основная цель управления сетью состоит в обеспечении передачи максимального количества сообщений с необходимым качеством (достоверностью, оперативностью, надежностью и др.). Под количеством переданных сообщений за определенный интервал времени с необходимым качеством будет пониматься *производительность сети связи*, а под максимально возможной производительностью – *пропускная способность сети* [6]. Она зависит как от динамики топологии сети, тяготений потоков сообщений, требований к ка-



Рис. 5.1. Функциональная модель системы управления СРС

честву их обслуживания, так и в значительной мере от эффективности управления сетью.

Кроме того, в зависимости от условий, сложившихся в сети, и требований к качеству обслуживания определенных типов трафика может возникать несколько целей (критериев) управления сетью S , причем все они имеют разную физическую природу, а также часть из них должна минимизироваться (например, t_z — время задержки передачи сообщений в сети, P — мощность передачи), а другие — максимизироваться (S — пропускная способность, E — энергоресурс батарей).

В дальнейшем под *оперативным управлением* сетью будем понимать процесс динамической организации такого целенаправленного влияния на элементы сети (а точнее, объектами управления являются топология, методы маршрутизации, методы множественного доступа и т.д.), в результате которого сеть обеспечивает максимальное (минимальное) значение некоторого критерия C (целевого состояния).

При этом одним из основных противоречий является противоречие между реальным составом информации об управляемых и неуправляемых характеристиках СРС и среды и требуемой полнотой, причем под требуемой полнотой понимается не вся потенциально необходимая для управления информация, а лишь та ее часть, которую в заданные сроки реально можно (необходимо) собрать и обработать данной СУ. Иными словами, необходимо решать не столько проблему неполноты описания системы, сколько ее следствие — проблему управления в условиях целевой неопределенности. Это в свою очередь приводит к трудностям формирования обобщенного критерия оптимальности управления. Следствием этого является неправомерность решения классической задачи оптимизации в виде стратегии управления,

удовлетворяющей ограничениям на использование всех ресурсов сети при оптимизации общей целевой функции.

В условиях децентрализованного управления и наличия противоречия между оптимальной информированностью управляющего объекта и своевременностью управляющих воздействий невозможно достичь глобальной оптимизации [3, 4]. Поэтому необходимо осуществлять локальную оптимизацию в рамках отдельного узла (зоны сети). В связи с этим основная цель управления декомпозируется на две составляющие: передача информации между парой отправитель—адресат ($a-b$) с заданным качеством при стремлении минимизировать расход сетевых (зональных) ресурсов на ее осуществление. Поэтому в условиях децентрализованного управления СРС каждый узел будет реализовывать две взаимосвязанные группы целей, определяющих многокритериальность управления:

- *пользовательские цели* $\{C_{nk}\}$, $i = \overline{1, K}$, определяющие поиск экстремума или выполнение ограничений по передаче сообщений (*пользовательская оптимизация* $U^*(t)$):

$$U^*(t) = \arg \underset{U(t) \in \Omega}{opt} C(X(t), U(t)), \quad (5.1)$$

$$C_n = \{\max S(X), \min t_3(X), \min P(X), \max E(X)\}, \quad (5.2)$$

$$X(t) = \{\xi(t), E(t), \Gamma^\xi(t), \omega(t), O(t), V_{cr}(t), B(t), d(t), T(t)\}, \quad (5.3)$$

при выполнении ограничений на ресурсы и требований к передаче трафика ξ -типа

$$\Omega = \{p_{ij} \leq p_{i \max}, s_{ij} \leq s_{ij \max}, \omega \leq \omega_{\max}, e_i \leq e_{\max}, t_3^\xi \leq t_{3 \max}^\xi, s^\xi \geq s_{\min}, n \leq N\},$$

где $U(t)$ – управляющее воздействие в СРС; C – цель управления СРС, определяющаяся параметрами состояния сети $X = \{x_i(t)\}$, $i = \overline{1, L}$ (зоны или информационного направления); S – пропускная способность сети (направлений); t_3 – задержка передачи пакетов; P – матрица мощностей передачи узлов, p_{ij} – мощность передачи в канале $i-j$; E – матрица энергоресурса батарей узлов $E(t) = \|e_i(t)\|$, e_i – энергоресурс батареи i -го узла; ω – интенсивность изменения топологии сети; $\Gamma^\xi(t) = \|\Gamma_{ab}^\xi(t)\| \leq \gamma_{\max}^\xi$ – интенсивность входящих потоков ξ -типа от a -го отправителя b -му адресату, $\xi = \overline{1, \Xi}$; s_{ij} – пропускная способность канала $i-j$, $i, j \in n$; t_3^ξ – время задержки передачи пакетов ξ -типа; $V_{cr}(t)$ – объем служебного трафика; $O(t)$ – объем информации, необходимой для передачи по направлениям; $B(t)$ – требования к безопасности информации; $d(t)$ – количество адресатов (при групповой передаче); T – топология сети; N – множество узлов сети;

- *сетевые (зональные) цели* $\{C_{cj}\}$, $j = \overline{1, J}$, реализующие поиск субоптимальных решений сети или ее зоне (*сетевая оптимизация*). Например, решение по управле-

нию СРС принимаются узлами сети с учетом определенных методов управления на основе информации о состоянии сети, которая получается путем рассылки и сбора служебного трафика. Так как общий трафик в сети состоит из интенсивностей полезного и служебного потоков, то очевидно, что уменьшение объема служебной информации $V_{ст}$ разрешит увеличить долю полезного потока и, как следствие, позволит увеличить пропускную способность сети:

$$U^*(t) = \arg \min_{U(t) \in \Omega} V_{ст}(X(t), U(t)). \quad (5.4)$$

Наличие множества различных и противоречивых критериев оптимальности СРС порождает проблему многокритериальной (векторной) оптимизации процесса ее функционирования. Задача оптимизации по векторному критерию состоит в отыскании решений, удовлетворяющих экстремуму одновременно всех компонент векторного критерия оптимальности. Существует два основных пути решения данной задачи: поиск компромиссных решений, оптимальных по Парето, и поиск решений, оптимальных в смысле обобщенного скалярного критерия, полученного путем свертки (скаляризации) всех компонентов векторного критерия оптимальности. Также одним из возможных путей решения данной задачи есть поиск компромиссных решений методом последовательных уступок, который состоит в ранжировании критериев по их важности. Кроме того, с учетом указанного предлагается проводить ранжирование целей управления в зависимости от требований к передаче трафика ξ -типа и состояния информационного направления (5.3) с целью обеспечения заданного качества обслуживания трафика ξ -типа в различных условиях функционирования СРС.

5.2. Основные подходы по интеллектуализации управления радиосетями

Появление принципиально новой разновидности задач управления, связанных с поддержанием необходимых режимов функционирования сложных динамических объектов в условиях неопределенности, потребовало развития специфических методов их решения с привлечением технологии искусственного интеллекта. Поэтому на сегодняшний день информационные системы управления интенсивно развиваются в направлении их интеллектуализации, при этом существенно изменяется технология принятия управленческих решений. Интеллектуальные информационные системы (ИИС) объединяют возможности систем управления базами данных и технологию искусственного интеллекта, благодаря чему хранение управленческой информации в них сочетается с обработкой и подготовкой ее для использования при принятии решений.

Длительное время считалось, что ИИС эффективны и применимы лишь для решения так называемых неформализуемых и плохо формализуемых задач, связанных с необходимостью включения в алгоритм их решения данных обучения на ре-

альном экспериментальном материале (например, задачи распознавания образа). Однако в последнее время ИИС все шире используются при решении задач в системах связи и телекоммуникаций: управление коммутацией, маршрутизация, управление трафиком, распределение каналов в подвижных системах радиосвязи и т.д. [10–13].

Рассматривая самоорганизующиеся сети радиосвязи, относящиеся к классу сложных динамических систем, функционирующих в условиях неполноты и недостоверности контрольной информации о состоянии сети, невозможно говорить об эффективной работе данных сетей без соответствующей системы управления. Приведем некоторые доводы в пользу того, что ИИС должны стать важнейшей составной частью системы управления СРС:

- во-первых, главной проблемой при управлении СРС является необходимость выбора решений из множества возможных управленческих решений в условиях неопределенности и в зависимости от ситуации, сложившейся в сети, а также требований к передаче определенного типа трафика;

- во-вторых, управление сетью требует сбора и обработки большого объема служебной информации об ее состоянии, использующейся методами управления на различных уровнях модели OSI для принятия соответствующих решений. Проблема получения информации с объектов (узлов сети), функционирующих в реальном масштабе времени, в настоящее время решена (использование различных способов зондирования сети). Но это породило другую проблему: как уменьшить долю информации до уровня, который действительно необходим для принятия решения системой управления? В то же время следует отметить, что потеря информации, поступающей от узлов сети, работающих в реальном масштабе времени, может существенно сказаться на конечном решении, принятом системой управления;

- в-третьих, нехватка времени на принятие решений и проблема координации взаимодействия методов управления, выполняющих различные функции (управление маршрутизацией, топологией, потоками данных, энергопотреблением, безопасностью и др.)

Важно отметить, что главная архитектурная особенность, которая отличает интеллектуальную систему управления от построенной по “традиционной” схеме, связана с подключением механизмов хранения и обработки знаний для реализации способностей по выполнению требуемых функций в условиях неопределенности (неполноты информации) при случайном характере внешних возмущений.

Система управления СРС имеет достаточно сложную архитектуру, включающую в свой состав ряд функционально-подчиненных подсистем. Иерархия их подчинения обуславливает декомпозицию исходных целей и задач управления на последовательность вложенных составляющих. Такое разделение предполагает многоуровневую организацию системы управления, обладающей развитыми интеллектуальными возможностями по анализу и распознаванию обстановки, формированию стратегии целесообразного поведения, планированию последовательности действий,

а также синтезу управляющих воздействий, направленных удовлетворить требования к обслуживанию определенных типов трафика.

Организация каждого уровня интеллектуальной системы управления сетью предполагает использование совокупности моделей представления знаний, информационной поддержки, описания контролируемого объекта и т.д. Главным отличием концепции иерархического построения систем управления СРС является использование методов и технологий искусственного интеллекта в качестве основных средств борьбы с неопределенностью внешней среды. Практическое воплощение этой концепции предполагает избирательное использование тех или иных технологий обработки знаний в зависимости от специфики решаемых задач и особенностей управляемого объекта.

Таким образом, на сегодняшний день происходит интеллектуализация информационных систем управления и трансформация их в ИИС. Наиболее перспективными для создания интеллектуальных систем управления представляются четыре технологии: экспертных систем, ассоциативной памяти, нечеткой логики, нейронных сетей [11]. Основная идея при этом заключается в переходе от строго формализованных алгоритмов, предписывающих, как решать задачу, к логическому программированию с указанием того, что нужно решать на базе знаний, накопленных специалистами в конкретных предметных областях.

Из-за динамического характера задач управления, их высокой размерности, сложности формирования полной системы показателей эффективности самой системы управления (из-за корреляции и нечеткого характера многих из них), неполноты и недостоверности контрольной информации целесообразно использование *нечеткой системы управления* (НСУ) – интеллектуальной СУ, использующей нечеткое описание управляемого процесса и системы его управления в виде нечеткой базы знаний, а также преобразующей нечеткое описание в последовательность команд для достижения целей управления [12]. Основным элементом НСУ является база знаний, состоящая из следующих компонентов [13]:

- *знания об объекте управления* (совокупности фактов о составе и структуре СРС, описываемых в виде множества понятий, отношений между ними и правил, отражающих закономерности управления);
- *знания о целях функционирования и управления* (структуре целей управления и правилах целеопределения, позволяющих выработать гипотезы о возможных в данной ситуации управления, реализация которых обеспечит перевод текущего состояния узла в состояние, удовлетворяющее целевым требованиям);
- *знания о способах достижения целей* (правилах вывода решений, с помощью которых осуществляется проверка достижимости целей управления с учетом наличия ресурса узла и ограничений, накладываемых на процесс управления).

Особенностями предлагаемой схемы нечеткой системы управления является учет последовательности цикла управления: оценка ситуации, определение цели управления, выявление необходимости управления, поиск допустимых решений и

- U^B – выявление цели управления с дальнейшей детализацией их на подцели и выработка решения (выбор протокола доступа, выбор метода передачи, способа рассылки служебной информации т.д.);

- U^P – реализация решения (рассылка служебных сообщений, резервирование ресурса, установление мощности передачи, диаграммы направленности антенны и др.).

Процесс управления может быть представлен совокупностью функций управления. В свою очередь каждую функцию можно разделить на отдельные задачи управления. Перечень задач управления СРС и их классификация представлены в [15]. Количество и конкретные задачи оперативного управления определяются характеристиками и условиями функционирования сети, а также принятыми технологическими решениями на этапе ее проектирования.

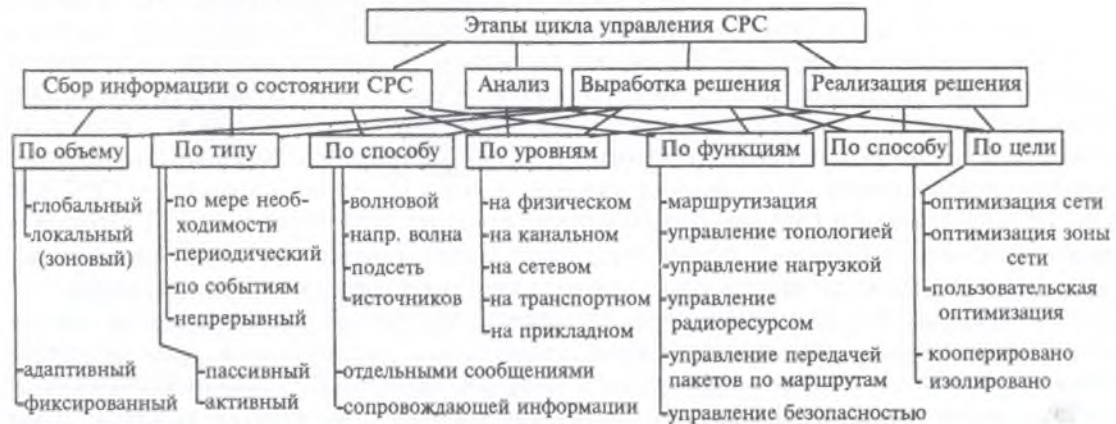


Рис. 5.3. Классификация задач цикла управления СРС по различным признакам

Сбор информации о состоянии сети. Контролируемая информация включает в себя параметры, которые описывают модель узла (сети или ее зоны). База данных управления МІВ (Management Information Base) должна поддерживаться в актуальном состоянии и может быть формализована следующими основными параметрами, разбитыми на группы [8]:

- *с позиции информационной нагрузки:* тип информации и требования к ее передаче, интенсивность входящей нагрузки, интенсивность обслуживания, размер свободной очереди, время пребывания пакетов в очереди и т.д.;

- *по уровням эталонной модели взаимодействия:* например, для физического уровня – способ модуляции, соотношение сигнал/шум, вероятность ошибки; канального уровня – скорость и время передачи, вероятность столкновений пакетов; для сетевого уровня – принятый метод маршрутизации, объемы служебного и полезного трафиков, величина отказов активных маршрутов, состояние маршрутной таблицы и т.д.;

- *организационно-технические*: принадлежность к иерархии управления (командир, подчиненный), величина мобильности, оставшийся энергоресурс аккумуляторной батареи, размерность сети и др.

Методы сбора информации можно классифицировать: *по объему* – глобальный и локальный (зонный), фиксированный и адаптивный; *по типу* – по мере необходимости, периодический, по событиям и непрерывный, пассивный (не предполагает рассылки служебной информации и основан на анализе транзитного трафика) и активный; *по способу передачи служебной информации* – волновой, направленная волна, по выделенной подсети и источников (передача информации по заранее определенному маршруту), отдельными сообщениями и сопровождающей информации (см. рис. 5.3).

Различные функции (уровни) управления (рис. 5.4) требуют различного объема (количества параметров) и глубины сбора информации о состоянии сети. Глубина сбора i -м узлом сети обычно определяется расстоянием (площадью при наличии системы позиционирования), выраженным числом ретрансляционных участков от данного узла. Конечно, знание полной информации о сети позволяет принимать более обоснованные решения, однако приводит к значительному росту служебного трафика в условиях динамики топологии и входного трафика. Поэтому *классические решения оптимального распределения потоков в сети* [3, 4] *неприемлемы в СРС*, так как требуют знания и глобального контроля сети, что невозможно в СРС. Отсюда – необходим поиск решений пользовательской оптимизации при минимизации ресурсов сети на их получение в условиях неполной информации об ее состоянии.

Данный подход уже реализован на сетевом уровне. Для минимизации объема служебного трафика при построении и поддержании маршрутов в условиях динамики топологии сети предложен метод маршрутизации ZRP – зонный гибридный (таблично-зондовый) [16]. Данный метод предполагает выделение каждым узлом маршрутной R -зоны (где R – количество ретрансляций) и аккумулирует преимущества двух основных методов построения маршрутов – табличного и зондового (контроль состояния сети внутри маршрутной R -зоны периодический, а за ее пределами – по мере необходимости). Адаптация размеров маршрутной R -зоны к ситуации на сети позволяет минимизировать объем служебного трафика. Данную идею целесообразно перенести на весь процесс управления сетью, а именно предлагается, что *глубина (величина зоны), объем (формат служебных сообщений), периодичность, способ, тип и алгоритм рассылки и сбора узлом служебной информации будут определяться его целью управления, ситуацией на сети и типом передаваемой информации*.

Отсюда делаем вывод, что каждый i -й узел сети будет осуществлять сбор информации о состоянии сети:

- *локально* в пределах контролируемой Z_i -зоны (объем служебного трафика внутри зоны не зависит от размерности сети);
- *с адаптацией формата служебных сообщений* (определяющих количество контролируемых параметров);

- внутри зоны периодически (с адаптацией периода сбора) и по событиям, за ее пределами – по необходимости;

- с использованием волновых алгоритмов передачи информации в Z_i -зоне [17].

Примеры зон $Z_i = f(v, \gamma, U_i)$ для узлов A, B, C и нахождение оптимального значения Z_i^* показаны на рис. 5.4, а и 5.4, б (общий объем служебного трафика $V_{ст} = V_{вт} + V_{мз}$, где $V_{вт}, V_{мз}$ – объемы внутрizonового и межzонного служебного трафиков).

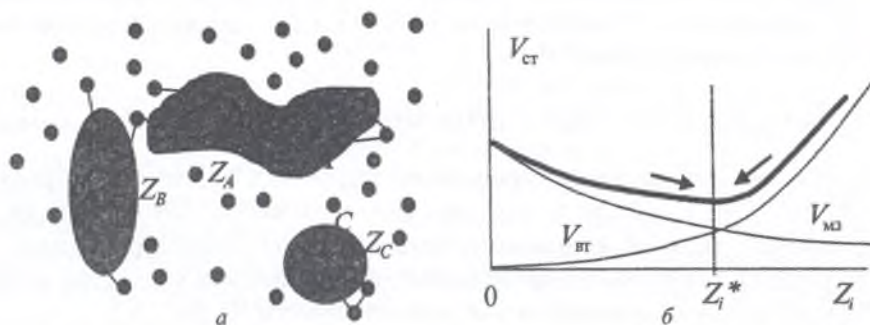


Рис. 5.4. Зоны контроля сети для узлов A, B, C и оптимизация их размеров

Анализ состояния сети. Этот анализ заключается в оценке каждым узлом параметров функционирования сети (Z -зоны, самого узла) и ее идентификации, установлении соответствия требованиям информационного обмена, определении цели управления и в выявлении необходимости управляющих воздействий. Математическим аппаратом, осуществляющим идентификацию состояния сети в условиях ее неполной информации, может служить теория нечетких множеств [12, 18]. Модель сети строится в виде логико-лингвистического описания входных и выходных переменных состояния. При этом для каждого из входных и выходных параметров устанавливается собственная лингвистическая переменная. В свою очередь значения лингвистических переменных определяют разбиение области допустимых изменений входных и выходных параметров на пересекающиеся нечеткие множества, соответствие которым задается функциями принадлежности.

Выработка решений. Осуществляется эта выработка по функциям управления (на различных уровнях и различными способами (см. рис. 5.3)) с реализацией одной из целей. Каждая цель характеризуется вектором признаков, которые можно разбить на следующие группы:

- ресурсы, т.е. совокупность средств достижения цели;
- управляемые параметры: на физическом уровне – мощность передачи, вид модуляции, скорость передачи и др.; на канальном – метод доступа; на сетевом – метод маршрутизации; на транспортном – способ передачи и т.д.;

• неуправляемые параметры: динамика топологии сети и ее размерность; заложенные протоколы информационного обмена; требования к качеству информационного обмена различных типов трафика; аппаратно-программные возможности узлов и др.

• выходные продукты, т.е. результаты решения или целевое состояние.

Основную цель управления необходимо декомпозировать на более простые цели. Для этого во время проектирования строится дерево целей. Результатом такой структуризации является граф цели–средства, вершины которого обозначены целями, а дуги отображают влияние достижения цели в подцели. С самых общих позиций целевую структуру (ЦС) можно представить в виде списка подцелей, связанных определенными отношениями [13]:

$$ЦС = \{Ц_0 R_{01}\{Ц_{11}, Ц_{12}, \dots, Ц_{1n}\}, R_{12}\{Ц_{21}, Ц_{22}, \dots, Ц_{2n}\}, \dots, R_{ij}\{Ц_{k1}, Ц_{k2}, \dots, Ц_{kn}\}\},$$

где $Ц_0$ – основная цель системы управления; $Ц_{im}$ – m -я подцель i -го уровня на целевой структуре, $i = 1, \dots, k$, $m = 1, \dots, n$; R – множество отношений на подцели структуры, причем если R описывает отношение на подцелях только смежных уровней, то следует говорить о дереве целей, иначе целевая структура вырождается в сеть. Фрагмент целевой структуры для узла изображен на рис. 5.5.



Рис. 5.5. Фрагмент целевой структуры узла сети

Реализация решений. Такая реализация достигается применением соответствующих стратегий (совокупностью методов и алгоритмов на различных уровнях). Используемые стратегии определяются требованиями к информационному обмену, составом управляемых и неуправляемых параметров сети, перечень которых осуществляется принятыми и реализованными на этапе проектирования коммуникационными технологиями, а также условиями функционирования сети.

5.4. Функциональная модель системы управления

Рассмотрим реализацию функциональных подсистем системы управления СРС (рис. 5.6) на различных уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем.

1. *Подсистема управления радиоресурсом.* В радиосети пространство, частота, код и время – четыре основные составляющие, определяющие разделение общего ресурса радиоканала. Эффективное использование спектра радиочастот – одна из основных задач управления. Недавно даже было определено новое понятие “когнитивное радио” (cognitive radio) [19] – технология, позволяющая использовать спектр частот динамическим способом и имеющая две основные характеристики (рис. 5.7):

- *способность к познанию* – обозначает возможность собирать или измерять информацию о радиосреде, причем эта возможность реализуется не только путем простого мониторинга мощности передачи в некоторых полосах частот, а за счет использования более сложных технологий, например самообучения и принятия решений, для сбора сведений о временных и пространственных параметрах сети, а также для исключения взаимных помех между пользователями. Это позволит определить ту часть спектра, которая не используется в данное время функционирования сети, и, следовательно, выбрать такие параметры передатчика, которые наиболее точно отвечают сложившейся обстановке в сети;

- *реконфигурируемость* – обозначает способность узла динамически подстраивать (программировать) параметры приемопередатчика в соответствии с параметрами радиосреды, т.е. приемопередатчик может быть запрограммирован принимать и передавать сигналы на различных частотах, а также использовать различные технологии доступа к радиосреде, поддерживаемые его аппаратными возможностями.



Рис. 5.6. Функциональная модель системы оперативного управления СРС

Коллективное и эффективное использование радиоресурса возлагается на методы доступа (МД). Анализ методов доступа [20, 21] показал их различную эффективность при различных условиях функционирования сети. Например, при малой нагрузке эффективен случайный доступ с контролем несущей (CSMA/CA), при сильной – детерминированный (TDMA), однако при этом требуется решение задач временной синхронизации и динамического распределения слотов между узлами. При генерации злоумышленником ложного трафика эффективен метод случайного доступа типа ALOHA.

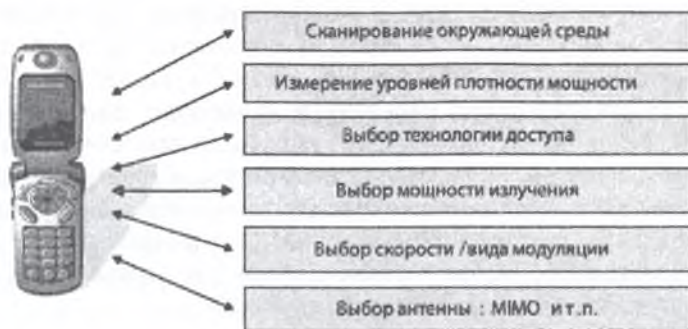


Рис. 5.7. Функции интеллектуальных средств радиосвязи по управлению радиоресурсом

В [21] показано, что единого метода доступа в СРС, удовлетворяющего всем требованиям, не существует. Выбор (синтез) необходимого метода доступа нельзя рассматривать изолированно от других функций управления. Для эффективного использования ресурсов сети в узлах необходимо предусмотреть возможность использования множества методов доступа. Применение конкретного метода доступа будет определяться параметрами информационной нагрузки, текущей целью управления сетью, ситуацией на сети (ее зоне) и принятыми решениями на других уровнях эталонной модели. Решения по использованию конкретного метода (в условиях отсутствия полной информации о состоянии сети) будет принимать нечеткая система управления [9, 12].

2. Подсистемы управления нагрузкой. Управление нагрузкой делится на управление доступом пакетов в сеть (применимы известные подходы [22]) и ее распределение по маршрутам передачи.

3. Подсистема управления маршрутизацией. Особенности СРС определяют ключевые требования к методам маршрутизации (многие из которых носят противоречивый характер): децентрализованное функционирование; минимальная загрузка сети служебной информацией; отсутствие заикливания маршрутов; быстрая сходимость; получение маршрута по мере необходимости; обеспечение нескольких маршрутов доставки информации к адресату; минимизация мощностей передач узлов и др. [23].

В настоящее время для использования в СРС предложено большое количество методов маршрутизации [23]. Каждый из них имеет преимущества и недостатки, расходует различное количество временных, связанных и вычислительных ресурсов на построение маршрута, имеет особенности в реализации. Поэтому на этапе проектирования необходимо определить множество методов маршрутизации для рассматриваемой СРС. Для достижения пользовательской и/или сетевой оптимизации необходимо использовать новый метод интеллектуальной маршрутизации, который рассмотрен в п.5.5.

4. Подсистема управления топологией [24]. Топология определяет потенциальные возможности сети по доставке данных между взаимодействующими узлами. Мобильность (отказы, уничтожение) узлов приводит к разнообразным сетевым топологиям. Тем не менее, сеть должна поддерживать необходимый уровень пропускной способности, который во многих ситуациях не удастся достичь только за счет маршрутизации. В то же время изменение топологии сети может иметь более значительный эффект в отличие от использования адаптивной маршрутизации.

Предполагается, что каждый узел i может изменять мощность передачи p_i и/или диаграмму направленности своей антенны. Увеличение p_i узлов приводит к повышению вероятности успешной передачи пакетов, увеличению скорости передачи в канале, снижению времени их передачи t_s (меньше количество ретрансляций), сокращению объема служебного трафика (уменьшение диаметра сети). Однако это требует большего расхода энергии батарей и обуславливает высокий уровень взаимных помех, что в итоге приводит к резкому снижению пропускной способности сети S . В свою очередь, уменьшение мощностей передач узлов позволяет увеличить S (за счет пространственного разнесения каналов и снижения уровня взаимных помех), снизить расход энергии батарей и, соответственно, увеличить "время жизни" сети, однако увеличивает t_s и $V_{ст}$, а также может привести к разделению сети на несвязные компоненты.

Задача нахождения новой топологии сети является *NP*-полной. Поэтому для сокращения перебора предложены правила [24], объединенные в базу знаний продукционного типа. Применение базы знаний позволяет получить близкие к оптимальным решения в режиме реального времени и использовать разработанный алгоритм для оперативного управления топологией сети.

Ключевой особенностью в предлагаемой процедуре является база знаний. Правила базы знаний работают в соответствии с различными целями управления сетью C_k (рис. 5.8). Управляемыми параметрами являются составляющие структуры сети (степень связности, угол и взаимное расположение узлов, диаметр сети и др.) и параметры узла (нагрузка, емкость батарей и пр.). Соответственно, структурные правила анализируют структуру графа сети и пытаются создать структуру сети, имеющую наивысшую производительность. Поточковые правила обнаруживают перегруженный участок сети и стараются направить сообщения по маршрутам с малой загрузкой. Все правила, независимо от цели управления, определяют одно из двух

возможных действий – увеличение или уменьшение мощности передачи узла (изменение направленности его антенны), что приводит к увеличению или уменьшению количества узлов, принимающих данную передачу.



Рис. 5.8. Классификация правил базы знаний

Таким образом, структурные правила могут быть получены в результате экспериментальных исследований структуры сети и теории графов. Они направлены на улучшение параметров сети. В качестве примера можно привести одно из структурных правил.

Правило 1. Если текущее значение степени связности узла i – $cv > cv_{opt}$ ($cv < cv_{opt}$), тогда необходимо уменьшить (увеличить) i -ю мощность передачи.

В основу данного правила положены результаты исследований Л. Клейнрока о так называемом “магическом числе” – оптимальной степени связности узлов сети cv_{opt} . Данные исследования показали, что сети с одинаковой степенью связности (регулярной структурой) имеют пропускную способность, больше чем сеть с нерегулярной структурой. Поэтому используются два правила. Одно “включается”, когда $cv > cv_{opt}$, а другое – в случае $cv < cv_{opt}$. Величина cv , оптимизирующая пропускную способность СРС в общем случае, составляет $cv_{opt} = 6-8$. В конкретной СРС значение cv_{opt} зависит от используемого протокола канального уровня и может быть рассчитано на этапе проектирования сети или получено в процессе “обучения” узлов на этапе ее функционирования.

Таким образом, для повышения эффективности функционирования СРС необходимо осуществлять оперативное управление топологией сети (создавать потенци-

альные маршруты передачи информации) и далее осуществлять управление построением и поддержанием маршрутов при полученной топологии [24].

5. Подсистема управления энергопотреблением узлов сети. Электропитание большинства узлов сети осуществляется от батарей, емкость которых определяет параметры процессора, памяти и мощность приемопередатчика. Поэтому протоколы различных уровней должны минимизировать энергопотребление с целью увеличения “времени жизни” сети [25]:

- *на физическом уровне* – за счет уменьшения мощностей передач между соседними узлами с сохранением необходимых параметров радиоканала (требуемого отношения сигнал/помеха, вероятности ошибки на бит и др.);

- *на канальном уровне* – реализацией энергосберегающих протоколов, предусматривающих режим “пассивного” квитиования (узел i , передав пакет узлу j , вместо квитанции ожидает ретрансляцию пакета узлом j) и/или режим “сна” (узел, обнаружив, что передаваемый пакет предназначен не ему, отключается на время передачи данного пакета);

- *на сетевом уровне* – выбором маршрутов по свертке метрик: мощностью передачи узла сети и оставшемся энергоресурсом батареи.

6. Подсистема управления качеством обслуживания. Для СРС характерны потеря части пакетов в процессе их передачи, временные задержки из-за необходимости построения (перестроения) маршрутов, что требует совершенствование механизмов функционирования протокола транспортного уровня (в частности, TCP). Для этого предлагается процесс межконцевой передачи пакета по маршруту разбить на участки с введением управления на каждом из них [26, 27]. Кроме того, передача различных типов трафика (речь, видео/аудио, данные, интерактивные приложения и т.п.) требует гарантированного качества обслуживания QoS (Quality of Service). При этом непрогнозируемый характер радиоканала, необходимость разделения его ресурса между соседними узлами (каждый из которых может быть источником QoS-трафика) создают трудности в обеспечении гарантированного качества передачи информации. Поддержка QoS-передачи в СРС влияет на большую часть рассмотренных функций, особенно на маршрутизацию. В этой ситуации построение маршрута заданного качества заключается в резервировании ресурсов узлов и радиоканалов на время передачи информации определенного типа [26–28]. Кроме того, для обработки разных типов трафика в узлах необходимо введение управления буферной памятью, механизмов поддержки приоритетов и др. Более детально управление качеством обслуживания рассматривается в п. 5.2.

7. Подсистема управления безопасностью [29–31]. Узлы сети функционируют в общей радиосреде и поэтому они уязвимы для потенциальных атак противника. Результатами деструктивных действий на СРС могут стать как прослушивание (сканирование) трафика, так и полная дезорганизация ее работы.

Можно выделить следующие основные типы атак:

- 1) анализ сетевого трафика (с целью идентификации топологии сети, идентификации узлов и их роли, идентификации протоколов обмена (маршрутизации, ад-

ресации и др.), идентификации операционных систем, определение уязвимостей узла и др.);

2) подмена доверенного объекта сети;

3) внедрение ложного объекта сети (например, с помощью ложного маршрута) с дальнейшей селекцией (модификацией) или подменой на нем потока информации;

4) отказ в обслуживании (насыщение полосы пропускания, переполнение буферов и др.);

5) нарушение прав доступа;

6) загрузка враждебного содержания (модификация информации при ее передаче по сети или в процессе обработки или хранения на узле, нарушение конфиденциальности информации и др.).

По аналогии с проводными сетями атаки в зависимости от характера действий противника делятся на *активные* и *пассивные* (рис. 5.9). *Пассивные атаки* осуществляются путем несанкционированного прослушивания радиоэфира и анализа сетевого трафика. В этом случае атакующая сторона не нарушает нормальную работу протоколов информационного обмена. Обнаружить пассивные атаки в беспроводной среде обычно невозможно и поэтому защититься от них довольно сложно. Отметим, что пространство проведения пассивных атак ограничено зоной радиосвязности.



Рис. 5.9. Классификация атак

Пассивные атаки происходят без воздействия на процесс передачи информации, в то время как *активные атаки* включают преобразование, модификацию и/или введение ложной информации (в том числе и управляющей). Результат действий активных атак может варьироваться от блокировки отдельных узлов, снижения производительности сети (или ее участка) до полной дезорганизации ее работы. Главное отличие активных атак от пассивных заключается в том, что они могут быть обнаружены. В свою очередь активные атаки делятся: на *внешние* (противник

использует собственное оборудование, отсутствие скомпрометированных узлов) и *внутренние* (наличие в сети скомпрометированных или захваченных узлов сети).

Практически все типы активных атак, осуществляемых в проводных сетях, возможны и в СРС, например, подмена сессии (hijacking), человек посередине (man-in-the-middle), навязывание ложного маршрута, повтор, разрушение маршрутов, отказ в обслуживании DoS (Denial of Service), опровержение (repudation), имитация (impersonation), затопление (SYN Flooding) и др. Хотя СРС обычно изолирована от общей сети (Интернет), в то же время атакующий может использовать ее уязвимости.

Реализация активных атак в СРС возможна на всех уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМ ВОС).

На физическом уровне противник может осуществлять постановку помех.

На канальном уровне атаки направлены на нарушение правил функционирования протоколов канального уровня. Например, использование децентрализованного канального протокола IEEE 802.11 DCF (множественный доступ с контролем несущей) предусматривает случайный розыгрыш окна *sw* (Contention Windows) начала передачи сообщения. Злоумышленник может воспользоваться этим и, назначая минимальное значение *sw*, получать приоритетный доступ к каналу. Это приведет к значительному снижению производительности в зоне радиопокрытия противником. Кроме того, противник может нарушить скоординированную работу энерго-сберегающих канальных протоколов, что приведет к скорейшему выходу батарей узлов из строя. Атаки типа "повтор" (дублирование захваченных пакетов с целью наложения на передаваемые пакеты или создания ложного трафика) или подмена (служебных пакетов) также могут значительно снизить производительность радиоканала.

На сетевом уровне активные атаки не направлены на протоколы маршрутизации. Их цель — частичная или полная дезорганизация работы СРС путем ввода в сеть повторной (устаревшей) или ложной (измененной) маршрутной информации (МИ).

Для защиты от внутренних атак (предполагается возможность существования в сети скомпрометированных узлов) пока не существует эффективных решений. Возможные способы защиты от внутренних атак предполагают:

- разделение информации на части, их шифрование и передача по нескольким каналам или независимым маршрутам;
- обнаружение скомпрометированных узлов и исключение их из процесса маршрутизации. Для этого каждый узел сети контролирует совокупность параметров соседних узлов и делает вывод об их "поведении". Выбор "лучшего" маршрута осуществляется в зависимости от истории "поведения" соседей;
- применение каждым узлом сети системы обнаружения вторжения IDS (Intrusion Detection System) для идентификации известных атак по содержащимся в базе данных сигнатурам атак; обнаружение может осуществляться локально или кооперированной работой нескольких узлов.

С криптографической точки зрения СРС не создают никаких новых проблем. Требования в части аутентификации, конфиденциальности, целостности и неопровержимости являются аналогичными и для сетей связи общего пользования. При этом центральной проблемой остается распределенное функционирование нескольких центров управления ключами [30, 31].

В любом случае нужно понимать, что абсолютную безопасность не может гарантировать ни одна существующая технология, а решение этих проблем лежит в плоскости разумной достаточности.

5.5. Управление качеством обслуживания

5.5.1. Особенности управления качеством обслуживания в самоорганизующихся радиосетях

Одной из задач оперативного управления в СРС является обеспечение передачи определенных классов (типов) трафика (табл. 5.1) с заданным качеством обслуживания QoS [32, 33]. Термин QoS обычно подразумевает набор параметров (пропускная способность, задержка доставки пакетов и ее вариация, вероятность потери пакетов, емкость батареи и др.) для определенного потока данных. Наиболее важными параметрами являются первые два. Так, трафик реального времени требует малой задержки передачи и ее вариации. Поточковый трафик (аудио- и видеоприложения) характеризуется однонаправленностью передачи и меньшей критичностью к задержке передачи. BE-трафик (“best effort” – обрабатывается “с максимальным усилием”, но без гарантий качества обслуживания) требует высокой надежности доставки, но требования к задержке менее жестки.

Таблица 5.1

Класс трафика	Тип трафика	Пропускная способность	Задержка передачи	Вариация задержки	% потеря пакетов
Трафик реального времени	Речь по IP (VoIP), видеоконференция	< 32 Кб/с, 128 Кб/с	< 150 мс (желательно), < 400 мс (предел)	1 мс	1 % видео, 3 % аудио
Потоковый	Потоковое видео, потоковое аудио	2 Мб/с, 20 Мб/с, 64 Кб/с–1,5 Мб/с	До 10 с	1мс	1 %
BE-трафик	Электронная почта, передача файлов, просмотр web-браузеров	–	Минуты, часы	–	0

Особенности СРС определяют следующие основные требования к QoS-методам управления:

- обеспечение параметров информационного обмена в соответствии с типом трафика;
- децентрализованность и распределенность функционирования (каждый узел владеет локальной информацией о состоянии сети, радиоресурс отдельного узла должен быть разделен с соседними узлами внутри зоны радиосвязности);
- нечувствительность к потере части пакетов и возможного отсутствия точных значений QoS-параметров (наличие проблемы “скрытого абонента” и возможные столкновения пакетов делают слабо прогнозируемыми параметры радиоканала);
- возможность адаптации к текущей ситуации на сети (например, мобильность узлов вызывает изменение топологии сети, что приводит к необходимости перераспределения ранее зарезервированных ресурсов);
- минимизация расхода вычислительных и сетевых ресурсов (объема служебного трафика).

В Интернете модель QoS имеет три основных уровня сервиса [34, 35]:

- 1) сервис “без гарантии доставки” (Best-effort service), известный как сервис без QoS;
- 2) дифференцированный сервис – мягкий QoS (Differentiated service/soft QoS): определенному классу трафика отдается предпочтение при обслуживании (в дисциплине обработки, выделяемой полосы пропускания и др.);
- 3) гарантированный сервис – жесткий QoS (Guaranteed service/ hard QoS): полное (абсолютное) резервирование сетевых ресурсов для трафика определенного класса; этот сервис обеспечивается такими QoS-средствами, как протокол резервирования ресурсов RSVP (ReSerVation Protocol) и дисциплиной управления очередями CBWFQ.

Однако применяемые QoS-модели в стационарных сетях не применимы в СРС, исходя из их особенностей. Для СРС также к настоящему времени предложен ряд QoS-моделей управления: INSIGNIA, FQMM (Flexible QoS Model for MANETs), iMAQ (Integrated MANET QoS), SWAN (Service Differential in Wireless Ad Hoc Networks), 2LQoS (Two-Layer QoS) [37] и др. Однако большинство из них предусматривает управление качеством на определенном уровне эталонной модели взаимодействия открытых систем и реализует простейшие алгоритмы адаптации и резервирование ресурсов узлов (каналов) к различному типу трафика.

Поэтому целью настоящей главы является анализ возможных методов управления качеством обслуживания по уровням ЭМ ВОС и построение общей модели QoS-управления в СРС.

Разработка QoS-методов управления для динамичной природы СРС при заданных требованиях является сложной задачей и требует отдельного решения ряда задач для большинства уровней ЭМ ВОС с координацией их работы под управлением системы управления сетью, реализованной на каждом узле сети [36]. Например, на физическом уровне необходима адаптация к быстрым изменениям параметров радиоканала; на канальном – минимизация столкновений пакетов, реализация “справедливого” доступа к радиоресурсу, обеспечение надежной передачи; на сетевом –

эффективное построение и поддержание маршрутов при изменениях радиоканалов и их ограниченной пропускной способности; на транспортном – управление потоками в условиях ошибок, мобильности узлов; на прикладном – адаптация параметров информационного обмена к условиям работы сети или ее зоны и координация всех уровней. Поэтому для управления качеством обслуживания предлагается ввести в архитектуру системы управления СРС соответствующую подсистему, которая будет осуществлять координацию всех остальных функциональных подсистем (управления маршрутизации, управления топологией и др.).

Каждая из подсистем управления реализуется на одном или нескольких уровнях ЭМ ВОС. Поэтому рассмотрим способы и методы реализации QoS-подсистемы по уровням ЭМ ВОС. Общими возможными решениями являются: адаптация уровня ЭМ ВОС (подсистемы управления) к условиям функционирования СРС и требованиям трафика, обеспечение дифференцированного сервиса и резервирование ресурса.

5.5.2. Методы QoS-управления на физическом уровне

Адаптация радиоканала основана на измерении параметров, характеризующих качество канала, и осуществляется выбором параметров модуляции, кодирования, уровня мощности, частоты, изменения структуры кадров и др.

Пропускная способность канала радиосвязи на рассматриваемом уровне W_k зависит от вида и параметров модуляции сигнала, вероятностей ошибок в радиоканале, способа кодирования, характеристик радиоканала [36]:

$$W_k = f(V_m, V_{\text{код}}, V_{\text{кан}}, P_{\text{ош}}),$$

где V_m – вектор параметров модуляции, включающий описание вида модуляции, значение скорости модуляции и др.; $V_{\text{код}}$ – вектор параметров способов кодирования; $V_{\text{кан}}$ – вектор параметров радиоканала; $P_{\text{ош}}$ – вероятность ошибки.

Использование методов кодирования совместно с методами модуляции дает мощный арсенал средств, который способен подобрать оптимальное сочетание кода и вида модуляции, обеспечивающих максимальную эффективность радиоканала: высокую скорость и помехоустойчивость. Поэтому необходим режим адаптации вида модуляции и способа кодирования с целью максимизации пропускной способности для каждого радиоканала. Например, протокол 802.11a может устанавливать значение скорости передачи: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 или 54 Мб/с. Каждой скорости передачи соответствует определенный вид модуляции. Значение скорости передачи представляет собой компромисс между пропускной способностью и расстоянием, что в свою очередь затрагивает верхние уровни ЭМ ВОС.

5.5.3. Методы QoS-управления на канальном уровне

В настоящее время предложено значительное количество протоколов канального уровня для СРС [20], однако большинство из них не предусматривают бес-

печение качества обслуживания. Решение данной задачи зависит от класса, применяемого в СРС, протокола канального уровня (случайного или детерминированного) [38–41].

Детерминированные протоколы доступа. Преимуществом детерминированных протоколов доступа (HIPERLAN/2, Bluetooth) является потенциальная возможность гарантированного сервиса. Для данных протоколов основная задача QoS-управления заключается в децентрализованном динамическом распределении слотов между узлами сети, причем в масштабе реального времени. Однако получение точного решения данной задачи связано со значительными вычислительными трудностями из-за ее *NP*-полноты. Поэтому на практике для распределения слотов используют эвристические алгоритмы. Другими недостатками являются необходимость эффективной временной синхронизации между всеми узлами (в большинстве случаев невозможность или нежелательность внешней синхронизации, например с использованием GPS, требует на внутреннюю синхронизацию значительных затрат временных и сетевых ресурсов), значительная чувствительность к мобильности узлов и другим изменениям канала (необходимо осуществлять перепланирование слотов).

Случайные протоколы доступа. Случайные протоколы доступа по своей природе не могут обеспечить гарантированный сервис. В то же время дифференцированный сервис может быть реализован следующими способами: дифференцированный доступ к каналу и его резервирование, приоритет в обслуживании очередей и гибридные схемы [38–40].

Отметим, что децентрализованный режим работы протокола IEEE 802.11 DCF (Distributed Control Function) предполагает следующую схему резервирования радиоканала: запрос/согласие/данные/квитанция (RTS/CTS/DATA/ACK) (рис. 5.10). Узел, перед передачей RTS, ожидает период времени $DIFS + B$ ($DIFS$ – наибольший интервал задержки, B – случайное время отсрочки в пределах окна состязаний sw). Если запрос на передачу (RTS) получатель принял без ошибок, то он посылает через короткий интервал (SIFS) пакет согласия (CTS). Осуществив безошибочный прием CTS, отправитель (по истечении SIFS) посылает пакет данных (DATE). Получатель, проверив безошибочность приема пакета данных, через интервал SIFS посылает отправителю квитанцию (ACK).



Рис. 5.10. Функционирование протокола IEEE 802.11 в режиме DCF

Управление последовательностью доступа узлов к каналу у протокола IEEE 802.11 DCF осуществляется за счет динамического изменения размера окна состязаний: $cw_{\min} < cw < cw_{\max}$ ($cw_{\min} = 32$, $cw_{\max} = 1024$). Время отсрочки (backoff interval) передачи выбирается в пределах окна состязаний, измеряется в слотах и определяется выражением $B = rand [0, cw_{\min} \cdot 2^r] t_{\text{сл}}$, где $t_{\text{сл}}$ – длительность слота окна состязаний; $rand$ – случайное число, выбранное с равной вероятностью в интервале $[0, cw_{\min} \cdot 2^r]$; $[x]$ – наибольшее целое, меньшее или равное x ; r и m – число повторных передач, $0 \leq r \leq m$.

Рассмотрим способы реализации дифференцированного сервиса.

Дифференцированный доступ к радиоканалу. Этот доступ может быть установлен в зависимости от различных параметров (приоритета трафика, размера пакета, веса узла, величины столкновений, значения пропускной способности и др.) [38–40].

Адаптация окна состязаний cw к классу (приоритету) трафика. Для этого для каждого приоритета pr устанавливаются свои предельные величины окон состязаний – cw_{\min}^{pr} и cw_{\max}^{pr} . В этом случае время отсрочки B_{pr} (для протокола IEEE 802.11e) определяется формулой

$$B_{pr} = rand [0, cw_{\min}^{pr} \cdot 2^r] t_{\text{сл}}, 0 \leq r \leq m.$$

Адаптация интервала задержки DIFS к приоритету трафика, т.е. $DIFS_{pr+1} < DIFS_{pr}$. В протоколе IEEE 802.11e интервал задержки назван AIFS (Arbitrary Inter Frame Spacing). Устранение столкновений пакетов одного приоритета будет осуществляться адаптацией времени отсрочки передачи B .

Адаптация времени отсрочки передачи B к условиям функционирования радиоканала (в условиях высокой нагрузки возможны столкновения). В этом случае

$$B_{pr} = rand [0, cw_{\min}^{pr} \cdot (2^r + R_c \cdot pr)] t_{\text{сл}}, 0 \leq r \leq m,$$

где R_c – величина столкновений между успешными передачами; pr – приоритет трафика.

Дифференциация максимальной длины фрейма. Для каждого узла в зависимости от его приоритета устанавливается максимальная длина фрейма. Таким образом, приоритетные узлы будут передавать больше информации во время доступа к каналу в сравнении с менее приоритетными узлами. При превышении размера пакета максимальной длины фрейма возможны два решения: при первом – узел уменьшает длину пакета до максимального значения фрейма; при втором – узел фрагментирует пакет. Оба подхода успешно используются при реализации протоколов транспортного уровня TCP и UDP. Однако в условиях помех увеличение длины пакета повышает вероятность его потери, что ведет к уменьшению эффективности данного решения.

Метод DFS (Distributed Fair Scheduling). Здесь значение B является функцией (линейной, экспоненциальной и др.) от длины пакета и веса узла. Например, при линейной функции имеем $B = [\alpha \cdot k \cdot l / \varphi]$, где α – случайная величина в интервале $[0, 9-1, 1]$; k – масштабируемый коэффициент; l – длина пакета; φ – вес узла. При столкновении пакетов дальнейший розыгрыш B осуществляется согласно правилам функционирования протокола IEEE 802.11 DCF.

Метод DWFQ (Distributed Weighted Fair Queue). Распределенная взвешенная справедливая очередь может быть реализована двумя алгоритмами. Первый алгоритм значение sw рассчитывает на различии между текущей и ожидаемой пропускной способностью (ПС): если текущее значение ПС меньше ожидаемого, то sw будет уменьшаться, увеличивая приоритет, и наоборот. Второй алгоритм вычисляет соотношение $L_i = w_i / \varphi_i$, где w_i – существующая ПС; φ_i – вес i -го узла. При сравнении своего значения L_i с соседними узлами узел будет адаптировать значение sw .

Метод DRRR (Distributed Deficit Round Robin). Назначается i -му классу трафика j -го узла квант сервиса Q_{ij} (равен требуемой пропускной способности) и счетчик дефицита DC_{ij} , уменьшаемый с каждым переданным пакетом. DC_{ij} используется для вычисления времени ожидания до передачи DIFS или времени отсрочки B . Большее значение DC_{ij} определяет меньшие величины данных интервалов.

Метод VMAC (Virtual MAC). В этом случае алгоритм осуществляет мониторинг радиоканала и локальную оценку степени достижения качества обслуживания по определенным параметрам (задержка, джиттер, величины столкновений и потерь пакетов), которые могут быть использованы верхними уровнями ЭМ ВОС. Также метод использует дифференциацию размера окна по приоритетам $sw_{\min}^{\text{ВП}} < sw_{\min}^{\text{НП}}$, $sw_{\max}^{\text{ВП}} < sw_{\max}^{\text{НП}}$, где ВП, НП – высокий и низкий приоритеты трафика.

Метод Blackburst scheme. Основная цель – минимизация задержки трафика реального времени. В отличие от других методов он навязывает определенные требования к высокоприоритетным узлам.

Управление очередями. Управление очередями имеет в своем распоряжении четыре основных механизма.

Метод PQ (Priority Queuing). Осуществляется обработка очередей с абсолютным приоритетом. Пакеты из очередей с более высоким приоритетом обслуживаются в первую очередь, а низкоприоритетные – могут остаться “на голодном пайке”.

Метод CBQ (Class-Based Queuing). Очереди обслуживаются на основе классов. Этот алгоритм в некоторой степени справляется с проблемой “голода”, присущей схеме PQ. Всем классам назначается хоть какая-то минимальная полоса пропускания, причем ее можно “заимствовать” у других классов (если у них она свободна).

Метод WFQ (Weighted Fair Queuing). Устанавливаются взвешенные справедливые очереди. Этот алгоритм увеличивает или уменьшает размер очереди в зави-

симости от уровня приоритета. Использование полосы пропускания во внимание не принимается.

Метод HWFQ (Hierarchical Weighted Fair Queuing). Выделяются иерархические WFQ-очереди. Система оценивает наихудшую задержку пакета при различных сценариях прохождения трафика и использует эти данные при организации обслуживания очередей.

Гибридные способы. Метод EDCF (Enhanced DCF). Этот метод реализован в протоколе IEEE 802.11e. Пакеты высшего приоритета имеют большую вероятность доступа к среде. Для этого определены четыре категории AC (access category) трафика: речь (AC_0), видео (AC_1), BE-трафик (AC_2) и непервоприоритетный трафик (AC_3). Каждая категория трафика имеет выделенную очередь в узле (всего восемь приоритетов) (рис. 5.11), интервал задержки передачи $AIFS_{AC}$ и свое значение времени отсрочки B за счет минимального cw_{min}^{AC} и максимального cw_{max}^{AC} значений окна состязаний.



Рис. 5.11. Схема дифференцированного доступа протокола IEEE 802.11e

Управление исправлением ошибок. Управление исправлением ошибок может осуществляться методами автоматического запроса повторной передачи, кодированием с прямым исправлением ошибок и совместным применением FEC-ARQ.

Методы автоматического запроса повторной передачи ARQ (Automatic Repeat reQuest). Метод SW-ARQ (Stop and Wait ARQ). Это – метод повторной передачи с остановкой и ожиданием. Он обеспечивает квитирование каждого правильно принятого пакета. Метод требует только полудуплексного канала, поскольку передатчик перед началом очередной передачи ожидает квитанции об успешном приеме предыдущей (используется в протоколе IEEE 802.11 DCF).

Метод SR-ARQ (Selective Repeat ARQ). Это – метод селективной повторной передачи. Повторно передаются только искаженные пакеты, затем передатчик начинает передачу с того места, где она прервалась, не выполняя повторной передачи правильно принятых пакетов. Метод эффективен с позиций задержки, однако механизм исправления ошибок сложнее и требуется дуплексная передача.

Метод GBN-ARQ (Go-Back-N ARQ). Это – метод повторной передачи на n шагов назад, где n – параметр, который определяет, сколько идущих друг за другом пакетов может послать передатчик, не дожидаясь прихода подтверждения (применим при дуплексной передаче). Для данного метода существует проблема адаптации “окна передачи”.

Выбор конкретного метода ARQ осуществляется исходя из компромисса между требованиями эффективного применения ресурсов связи и необходимостью дуплексной связи.

Кодирование с прямым исправлением ошибок FEC (Forward Error Correction). Преимущество методов ARQ перед методом прямого исправления ошибок заключается в более простой реализации и меньшей избыточности. Кроме того, информация передается повторно только при обнаружении ошибок. С другой стороны, метод прямого исправления ошибок может оказаться более приемлемым, если обратный канал недоступен или задержка при использовании ARQ слишком велика [9].

Совместное применение FEC-ARQ. Первый тип FEC-ARQ. При этом типе реализуется обнаружение и исправление ошибок для каждого пакета в пределах корректирующей способности кода. В случае невозможности исправить ошибку осуществляется повторная передача пакета (определенное количество раз).

Второй тип FEC-ARQ. Дополнительно осуществляется накопление принятых с ошибками пакетов для реализации мажоритарного принципа повышения достоверности приема.

Таким образом, использование квитирования для исправления ошибок вызывает вариацию задержки передачи и поэтому не может обеспечить гарантированный сервис, в то же время FEC позволяет поддерживать однородную пропускную способность и определенную задержку передачи. Совместное применение методов помехоустойчивого кодирования с исправлением ошибок и повторных передач практически оправдано благодаря большей устойчивости, но тогда хуже используется пропускная способность при малых значениях ошибки.

5.5.4. Методы QoS-управления на сетевом уровне

Для обеспечения заданного качества обслуживания информационных потоков в СРС маршрутизация играет решающую роль. Процесс QoS-маршрутизации включает в себя следующие этапы: построение маршрута заданного качества (с учетом принятых протоколов канального уровня), осуществление резервирования данного маршрута и поддержание его с заданными параметрами.

Общая постановка задачи QoS-маршрутизации [28]. Представим сеть ненаправленным весовым графом $G = (V, E)$, где V – множество узлов, E – множество каналов. Каждый канал $e = (v_i, v_j) \in E$ может характеризоваться положительной метрикой: пропускной способностью $w(e) \in Z^+$ (например, $1 = 10$ кб/с) и задержкой пространства $d(e) \in Z^+$ (например, $1 = 10$ мс). Обозначим ациклический путь p в G

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

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

При построении независимых K -маршрутов передачи (многопутевая маршрутизация) от отправителя к адресату ($P = \{p_1, p_2, \dots, p_K\}$) пропускная способность и задержка передачи информации определяются выражениями

$$W(P) = \sum_{k=1}^K w(p_k) \text{ и } D(P) = \max_{p_k \in P} \{d(p_k)\}.$$

Тогда задача QoS-маршрутизации может быть сформулирована следующим образом: найти маршрут p (или множество маршрутов $P = \{p_k\}, k = \overline{1, K}$), удовлетворяющий требованиям

$$W(P) \geq W_0 \text{ и/или } D(P) \leq D_{\max},$$

где W_0 – необходимая пропускная способность; D_{\max} – максимальная задержка передачи.

Методы измерения QoS-параметров. В СРС оценка качества маршрутов основывается на статистике, собранной на канальном (сетевом) уровне. И если при использовании детерминированных канальных протоколов пропускная способность и задержка передачи в канале достаточно стабильны, то для случайных канальных протоколов измерение представляет определенную сложность. Методы измерения QoS-параметров могут быть активные и пассивные [39, 42, 43].

Активные методы измерения посылают служебные пакеты на канальном уровне (например, HELLO-пакеты) или их совмещают со служебными пакетами сетевого уровня (например, зондами при зондовой маршрутизации). Недостаток этих методов: быстрое старение полученной информации и внесение дополнительного служебного трафика.

Пассивные методы собирают статистику передачи пакетов на канальном (сетевом, транспортном) уровне и позволяют вычислить такие параметры информационного обмена, как время задержки передачи, время простоя канала, среднюю скорость передачи и др. Например, время задержки передачи t_3 между двумя соседними узлами для протокола IEEE 802.11 определяется выражением

$$t_3 = t_o + (t_n + t_p + t_{cc})R + \sum_{r=1}^R B_r,$$

где t_o – время ожидания в очереди; t_n – время передачи пакета; t_p – время розыгрыша передачи; t_{cc} – время передачи служебных сообщений (RTS, CTS и др.); R –

необходимое число повторных передач; B_r — время ожидания для каждой передачи r . В связи с тем, что состояние сети меняется достаточно быстро, среднее время задержки передачи может быть вычислено как взвешенное предыдущее значение \bar{t}_3 и последнее значение задержки: $\bar{t}_3 = \alpha \bar{t}_0 + (1 - \alpha) t_3$.

Преимущество пассивных методов — они не вносят служебный трафик. Однако они не в полной мере адекватны конфликтной природе случайных канальных протоколов.

Кроме оценки состояния ресурсов, целесообразно использовать аналитические модели прогноза параметров радиоканала (маршрута). Множество QoS-метрик, соответствующих определенным сетевым ресурсам, обуславливают наличие соответствующего множества моделей. Данные модели могут использовать различный математический аппарат [42, 43]: теорию марковских процессов, теорию игр и др. Однако на сегодня данные модели имеют ряд ограничений: не учитывают приоритетность трафика, справедливы для стационарных потоков и требуют дальнейшего развития и исследования.

В целом модели оценки (прогноза) ресурсов сети должны быть реализованы в соответствующей базе моделей QoS-подсистемы управления СРС.

Методы QoS-маршрутизации. В настоящее время для применения в СРС предложен ряд QoS-версий известных методов маршрутизации [45, 46].

В работе [45] предложена QoS-версия табличного метода маршрутизации DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector). В качестве метрики выбора маршрута предложено использовать значения пропускной способности и осуществлять резервирование маршрута. Другой метод QOLSR [46], использующий в основе метод OLSR (Optimized Link State Routing), предполагает несколько параметров для выбора маршрута. Однако известно, что нахождение кратчайших маршрутов с более чем одной метрикой является *NP*-полной задачей [18]. Поэтому для их нахождения предлагается использовать эвристики.

В зондовом методе маршрутизации QAODV поля зондов-запросов включают значения максимальной пропускной способности и минимальной задержки передачи. В [47] предложен метод многопутевой зондовой маршрутизации для СРС 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-ответов по выбранным маршрутам с требованием резервирования ресурсов узлов и каналов).

В [46] проведен анализ эффективности методов QAODV, QDSR, QOLSR при различных условиях функционирования сети (выбор данных методов обусловлен принятием группой IETF в качестве стандартов методов AODV, DSR, OLSR). Показано, что эффективность различных методов маршрутизации зависит от типа и

параметров СРС, ситуации на сети, а также методов управления, применяемых на других уровнях ЭМ ВОС.

Поэтому предлагается реализовать так называемую “активную” маршрутизацию, которая предусматривает следующие подходы (в отличие от традиционных) [48]:

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

Методы QoS-управления топологией. Под управлением топологией СРС будем понимать управление, изменяющее топологию СРС в процессе ее функционирования за счет перераспределения мощностей передач узлов p_i (и/или формирование диаграмм направленности их интеллектуальных антенн β_i) с целью обеспечения пользовательской или системной оптимизации [24].

Возможными решениями могут быть:

- разделение различных потоков по имеющейся топологии с целью устранения конфликтов между различными конкурирующими потоками [49];
- применение новых канальных протоколов, обеспечивающих повышение пропускной способности [50] маршрута за счет управления топологией. Так, на рис. 5.12 показано, что узел A может передавать узлу C со скоростью 2 Мб/с, а осуществляя адаптацию физического уровня, передавать по радиоканалу $A-B$ со скоростью 5,5 Мб/с, а по каналу $B-C$ – со скоростью 11 Мб/с;
- использование направленных антенн [51] для пространственного резервирования маршрутов передачи.

На рис. 5.13 показаны два независимых маршрута передачи: $A-B-C-D$ и $E-F-G-K$, полученных с использованием направленных антенн (штриховой линией отмечена связность при использовании ненаправленных антенн).

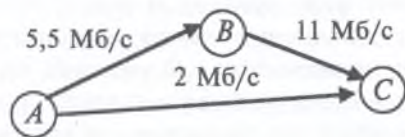


Рис. 5.12. Пример разноскоростной передачи в СРС

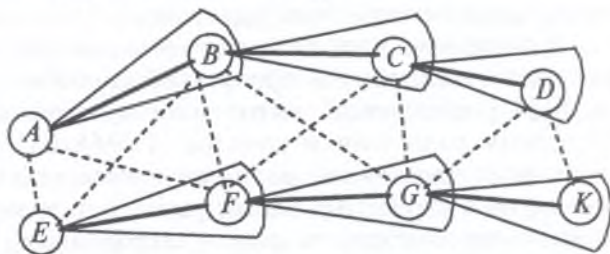


Рис. 5.13. Пример построения независимых маршрутов в СРС

5.5.5. Методы QoS-управления на транспортном уровне

Транспортный уровень обычно включает функционирование UDP и TCP протоколов. Например, для интерактивного видео- или аудиотрафика предпочтительнее использование протокола UDP, другие – требуют TCP.

В Интернете при функционировании TCP-протокола предполагается, что большинство потерь пакетов обусловлено перегрузками в сети, поэтому применяются методы управления потоком (реализуются с помощью алгоритма “скользящего окна”) и перегрузкой (реализуется с помощью алгоритмов “медленный старт”, “предотвращение перегрузки”, “быстрая повторная передача” и “быстрое восстановление”). Данное предположение не верно в условиях СРС, так как потеря пакетов может быть еще вызвана помехами в канале и изменениями маршрутов передачи. Поэтому для улучшения TCP-протокола могут быть использованы три группы методов: TCP с явной обратной связью, TCP без явной обратной связи и TCP во взаимосвязи с другими уровнями [52, 53].

TCP с явной обратной связью (TCP-F, TCP-ELFN, ATCP). Для оповещения отправителя о потере пакетов по причине ошибок или отказа маршрута (а не только перегрузки как в Интернет) посылается сообщение об отказе ELFN (Explicit Link Failure Notification). После приема данного пакета узел прекращает передачу и останавливает таймеры RTO и размер окна. Передача будет возобновлена после построения нового маршрута.

TCP без явной обратной связи (TCP-DOOR и др.). Он может быть основан на измерении скорости получения пакетов получателем или измерения задержки “из-конца-в-конец”.

TCP во взаимосвязи с другими уровнями должен быть интегрирован с канальным и сетевым уровнями по имеющейся информации управления.

5.5.6. Методы QoS-управления на прикладном уровне

Адаптивность функционирования может быть обеспечена и на прикладном уровне: динамическое определение QoS-параметров, адаптивные алгоритмы сжатия, алгоритмы кодирования и др.

Для решения задачи передачи информации с заданным качеством на прикладном уровне предполагается функционирование подсистемы QoS-управления, архитектура которой представлена на рис. 5.14.

Входной трафик (пользовательский и служебный) проходит классификацию по типу: служебный трафик направляется на обработку соответствующим методом управления (по уровням ЭМВОС), пользовательский трафик (под управлением блока управления очередями) в соответствии с классом помещается в свою очередь. Методы управления очередями обеспечивают поступление, хранение и передачу на обслуживание поступающих в узел пакетов, а также управление сбросом пакетов в период перегрузки.

Классификатор определяет принадлежность потоков к классам обслуживания, в результате чего становится возможным мониторинг нагрузки каждого потока и определения соответствия текущих значений параметров заявленным. Если сеть имеет достаточное количество ресурсов для обеспечения запрошенных параметров и определено, что новая нагрузка не повлияет на качество обслуживания существ-

вующих потоков, то этот новый поток начинает передавать данные в сеть. Иначе, запрос нового потока отвергается. Блок измерений осуществляет оценку QoS-параметров и их запись в базу данных управления (MIB, Management Information Base).

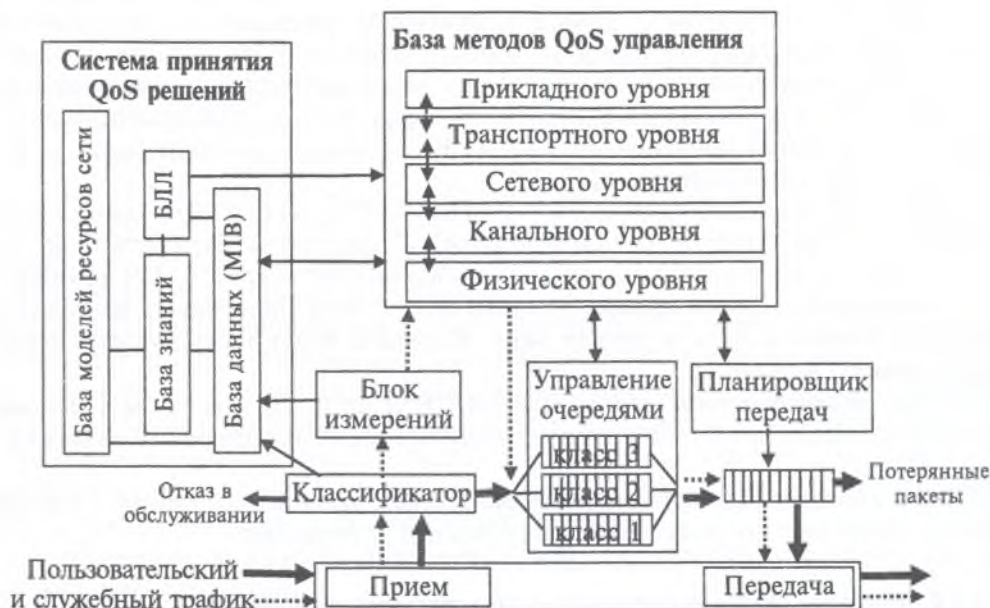


Рис. 5.14. Архитектура QoS в системе управления СРС

Система принятия QoS-решения состоит из базы знаний (содержит знания об объекте управления, о целях функционирования и управления, о способах достижения целей), базы данных управления, блока логического вывода (БЛЛ) и моделей ресурсов сети [9]. В условиях децентрализованного управления каждый узел будет реализовывать две взаимосвязанные группы целей: пользовательские (достижение заданного качества обслуживания) и сетевые (зоновые) (достижение оптимальных сетевых или зоновых показателей эффективности). Задача принятия решения по QoS-управлению СРС сведена к задаче многокритериальной оптимизации для нечетко заданных целей и альтернатив [9], представленных в виде дерева “цели–методы управления” (вершины обозначают цели, а дуги отображают влияние достижения цели в подцели) [54]. Проведена декомпозиция глобальной цели управления СРС по функциям (по функциональным подсистемам), каждая из которых делится на задачи и реализуется по уровням ЭМВОС [55].

Функции планировщика заключаются в распределении ресурсов между конкурирующими потоками в узле (буферное пространство, процессорное время) и ра-

диоканале в соответствии с заданными параметрам качества обслуживания. При помощи планировщика возможно сглаживать пульсации трафика и примерно задавать скорость передачи.

Таким образом, обеспечение заданного качества обслуживания в СРС должно осуществляться по функциям с их реализацией на всех уровнях ЭМВОС под управлением выделенной QoS-подсистемы, основными элементами которой является база методов управления (по уровням ЭМВОС) и подсистемы принятия QoS-решений (содержит знания о целях управления и методах их достижения, а также базу моделей ресурсов сети). Нами рассмотрены основные методы и способы QoS-управления по уровням ЭМВОС. Направлением дальнейших исследований является построение математических моделей QoS-методов управления и исследование их поведения с целью выработки правил функционирования целевой иерархии системы управления.

5.6. Интеллектуальный метод маршрутизации в самоорганизующихся радиосетях

Как видно из проведенного анализа во второй главе, таблично-ориентированные методы маршрутизации (ММ) эффективны при незначительной динамике сетевой топологии, зондовые — при среднем и высоких значениях изменения топологии, волновые — при очень высокой динамике, т.е. ситуации, при которой невозможно отследить изменения топологии сети [23]. Кроме того, каждый тип трафика при передаче в сети требует построения и поддержания маршрутов передачи с целью обеспечения соответствующего качества обслуживания. Поэтому для достижения эффективного функционирования СРС в зависимости от динамики сетевой топологии и требований к передаче разных типов трафика предлагается интеллектуализировать процесс принятия решения по маршрутизации путем использования аппарата нечеткой логики, основным компонентом которого является база правил нечетких продукций, занимающая центральное место в процедурах нечеткого вывода.

Как показал анализ существующих методов маршрутизации (глава 2), в сетях с динамической топологией свою эффективность показали зондовые ММ [56], поэтому при разработке нового интеллектуального ММ (НИММ) за основу взят именно зондовый ММ (в частности, DSR) [57]. Основными преимуществами протокола DSR являются быстрая адаптация к изменениям топологии сети, отсутствие периодической рассылки служебной информации в сети, возможность обучения, а недостатками — довольно значительный служебный трафик при использовании волнового способа передачи на этапе создания маршрута, задержка в построении маршрута.

Рассмотрим разработанный нами для повышения эффективности функционирования DSR интеллектуальный метод маршрутизации (ИММ) в СРС.

Суть метода. Разработка любого ММ должна включать синтез следующих основных функций: сбор и рассылка информации о состоянии сети, хранение мар-

шрутной информации, вычисление маршрутов и др. [23]. В ИММ предлагается введение иерархии процесса принятия решения по поиску маршрута заданного качества по следующим этапам: выбор целевой функции управления маршрутами (построение маршрута минимальной (заданной) стоимости по выбранным метрикам), типа маршрутизации, количества маршрутов и способа зондирования в сети. Выполнение этих функций возможно только при условии реализации системы управления в каждом узле СРС, в состав которой будет входить подсистема управления маршрутизацией [58]. Рассмотрим указанные функции детальнее.

Выбор целевой функции управления маршрутами. Этот выбор осуществляется путем определения соответствующих метрик поиска маршрута (многопараметрическая маршрутизация). В большинстве предложенных ММ используется однопараметрическая маршрутизация, которая при выборе кратчайшего пути учитывает только один параметр (зачастую, количество ретрансляций или время доставки сообщений). Однако требования к передаче информации с заданным качеством обслуживания могут выражаться следующими параметрами: пропускной способностью, задержкой передачи, количеством ретрансляций, вероятностью доставки, количеством адресатов, емкостью батарей, безопасностью и др. Эти параметры будут определять состояние сети (направления связи) в каждый момент времени ее функционирования, а соответственно, и цель ее функционирования (максимизация пропускной способности и "времени жизни" батарей, минимизация времени доставки информации и мощности передатчиков), т.е. необходимо говорить об оптимизации указанных параметров или о маршруте с заданным качеством обслуживания (QoS-маршрутизация) [23].

Выбор типа маршрутизации (однопользовательская или групповая). Условия функционирования СРС предусматривают рассылку информации определенной группе пользователей. Поэтому для эффективного использования сетевых ресурсов возникает задача выбора: строить групповой маршрут или отдельные маршруты к каждому пользователю.

Выбор количества маршрутов (один или несколько). Использование многопутевой маршрутизации позволит: увеличить надежность доставки информации, повысить безопасность передачи информации, сократить объем служебного трафика (реже осуществляется перестройка маршрута) и уменьшить время доставки информации (при распределении входной нагрузки по нескольким независимым маршрутам передачи).

Выбор способа рассылки служебной информации в сети. Одними из основных недостатков зондовой маршрутизации есть значительные объемы служебного трафика и время построения маршрута, которое зависит от глубины зондирования и размера зонда-запроса. Поэтому предлагается использовать совокупность способов устранения указанных недостатков [58].

1. Локальное зондирование (ограничение зоны рассылки зондов величиной h_p): минимизация количества зондов-запросов $N_{зз}$, рассылающихся в сети, может быть осуществлена путем введения в формат зонда поля TTL (Time-To-Live),

$h_p = TTL$. В результате, каждый узел при ретрансляции зонда вычитает из поточного значения TTL единицу. Если $TTL = 0$, то зонд уничтожается.

2. Упреждающее построение нового маршрута: для разных типов трафика, например речи, величина времени передачи $t_{\text{пл}}$ имеет граничное значение. Возможным решением в данной ситуации есть прогнозирование времени существования маршрута и упреждающее построение нового маршрута (отправителем или промежуточными узлами).

3. Построение маршрутов (зондирование) адресатом. Организационно-техническое построение сети может определять перечень адресатов, с которыми будет постоянно поддерживаться информационный обмен большинством узлов сети. Поэтому для сокращения количества зондов-запросов при построении маршрутов отправителями целесообразно возложить функцию построения маршрутов на адресата. Он будет осуществлять периодическое зондирование сети для постоянного поддержания маршрутов к отправителям.

Процесс построения маршрутов осуществляется согласно правилам функционирования зондовых методов маршрутизации. Схематично процесс взаимодействия узлов изображен на рис. 5.15.

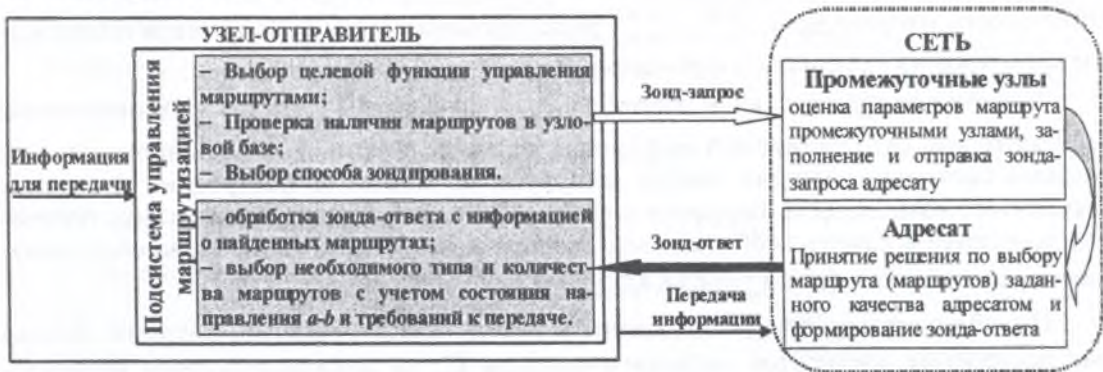


Рис. 5.15. Схема взаимодействия узлов сети при зондовой маршрутизации

В случае необходимости передачи информации узлом-отправителем происходит обращение к подсистеме управления маршрутизацией. Проверяется наличие маршрута в узловой базе маршрутов. При отсутствии маршрута заданного качества в базе отправителем инициируется создание зонда-запроса, с помощью которого будет проводиться сбор информации о состоянии сети. При передаче зонда-запроса сетью промежуточными узлами проводится оценка параметров маршрута. Значения параметров записываются в соответствующие поля зонда-запроса, после чего зонд передается адресату.

После получения зонда-запроса адресат принимает решение по выбору маршрута передачи информации заданного качества и формирует зонд-ответ, который передается отправителю. Зонд-ответ, проходя через промежуточные узлы, резерви-

рует их ресурсы с учетом требований к передаче того или иного типа трафика. На стороне отправителя, после получения зонда-ответа, определяется тип маршрутизации и количество маршрутов передачи с учетом ситуации на информационном направлении $a-b$ и выбранной целевой функции управления маршрутами.

Математическая постановка задачи зондовой маршрутизации. Модель сети.

Сеть представляется направленным графом $G = (V, E)$, где $V = \{v_n\}$, $n = \overline{1, N}$, — множество случайно расположенных узлов и $E = \{e_j\}$, $j = \overline{1, J}$ — множество каналов. Каждый узел имеет идентификационный номер, топология сети определена.

Заданы параметры СРС (информационного направления): количество узлов — $N \leq 100$; радиоканалы — симметричны и полудуплексные; емкость батарей узла — $E^b(t) = \|e_i^b(t)\|$; тип информации — $\xi = \overline{1, 2, 3}$, где 1 — видео, 2 — речь, 3 — данные; количество адресатов при каждой сессии — $|b| = \overline{1, N-1}$ (многопользовательская передача); интенсивность входных потоков — $\Gamma_{\xi}^{a-b}(t) = |g_{\xi}^{a-b}(t)|$, $g_{\xi}^{a-b}(t) \leq g_{\max}^{a-b}$ на направлении $a-b$; $\omega^{a-b} \leq \omega_{\max}^{a-b}$ — интенсивность изменения топологии; пропускная способность направления $s^{a-b} \leq s_{\max}^{a-b}$; радиосвязность между узлами сети поддерживается одним из протоколов канального уровня.

Множество требований к методу маршрутизации $\{TR_q\}$, $q = \overline{1, 5}$: минимальная загруженность сети служебной информацией; возможность одновременного использования нескольких метрик поиска маршрута; возможность построения групповых маршрутов; возможность передачи информации несколькими маршрутами; получение маршрута в случае необходимости; обеспечение заданного качества обслуживания трафика ξ -типа ($s^{\xi} \leq s_{\text{доп}}^{\xi}$, $t_3^{\circ} \leq t_{3\text{доп}}^{\circ}$).

Необходимо: осуществить синтез метода маршрутизации, который обеспечит построение маршрутов заданного качества U_m на информационном направлении между отправителем a и адресатом b при удовлетворении *пользовательской оптимизации* (5.1) и выполнении условий *системной оптимизации* (5.4).

Как видно из выражения (5.2), в ходе функционирования СРС может возникнуть несколько целей (критериев) управления сетью, причем все они имеют разную физическую природу, а также часть из них должна минимизироваться (t_3, P), а другие (S, E_6) — максимизироваться. Это порождает задачу многокритериальной (векторной) оптимизации процесса функционирования СРС, причем сама сеть выступает в качестве динамической системы со сменными критериями качества.

Существует большое количество методов решения задач многокритериальной оптимизации, которые детальнее рассмотрены в [59]. С учетом того, что требования к обслуживанию разных типов трафика различаются и могут изменяться даже в ходе передачи информации, а ситуация в сети будет требовать управления системой поиска маршрута по тем критериям, которые в данный момент времени имеют наи-

большее значение, можно заключить, что одним из возможных путей решения данной задачи есть поиск компромиссных решений методом последовательных уступок, который состоит в ранжировании критериев по их важности. Кроме того, ранжирование целей управления предлагается проводить в зависимости от требований к передаче трафика ξ -типа и состояния информационного направления (5.5) с целью обеспечения заданного качества обслуживания трафика ξ -типа в различных условиях функционирования СРС.

Пусть преимущество критериев состоит в выполнении соотношения:

$$C_1^{a-b}(X) > C_2^{a-b}(X) > \dots > C_k^{a-b}(X), \quad k = \overline{1,4}. \quad (5.5)$$

Тогда решается задача максимизации (минимизации) одного критерия $C_1^{a-b}(X)$:

$$C_1^{a-b}(X) \rightarrow \max,$$

а найденное максимальное значение критерия обозначим как $\max C_1^{a-b}(X)$. Исходя из требований к качеству обслуживания определенного типа трафика и принятой точности, назначаем некоторую уступку Δ_1 для первого критерия, которую можно допустить, чтобы оптимизировать критерий $C_2^{a-b}(X)$, т.е. решается задача математического программирования:

$$C_2^{a-b}(X) \rightarrow \max,$$

$$C_1^{a-b}(X) \geq \max C_1^{a-b}(X) - \Delta_1.$$

Далее определяется уступка Δ_2 и решается задача:

$$C_3^{a-b}(X) \rightarrow \max,$$

$$C_1^{a-b}(X) \geq \max C_1^{a-b}(X) - \Delta_1,$$

$$C_2^{a-b}(X) \geq \max C_2^{a-b}(X) - \Delta_2,$$

и, соответственно, задача

$$C_4^{a-b}(X) \rightarrow \max,$$

$$C_1^{a-b}(X) \geq \max C_1^{a-b}(X) - \Delta_1,$$

$$C_2^{a-b}(X) \geq \max C_2^{a-b}(X) - \Delta_2,$$

$$C_3^{a-b}(X) \geq \max C_3^{a-b}(X) - \Delta_3.$$

Из-за динамического поведения СРС, сложности формирования полной системы показателей их функционирования, неполноты и недостоверности контроль-

ной информации о состоянии информационного направления предлагается принимать решение по выбору целевой функции управления сетью с помощью нечеткого контроллера (рис. 5.16), который для их принятия использует аппарат нечеткой логики [12].

Контроллер использует нечеткое описание управляемого процесса и системы его управления (в виде нечеткой базы знаний), а также превращает нечеткое описание в последовательность команд для достижения целей управления маршрутизацией.

Этапы функционирования ИММ. Интеллектуальный метод маршрутизации предусматривает два основных этапа: построение маршрутов и их поддержание.



Рис. 5.16. Нечеткий контроллер в подсистеме управления маршрутизацией

Этап построения маршрутов. На данном этапе узел выполняет две основные функции: поиск маршрутов (отвечающих требованиям к передаче ξ -го типа трафика) среди имеющихся в базе маршрутов; в случае отсутствия маршрута заданного качества – выбирает способ построения нового маршрута. Схема алгоритма поиска маршрута заданного качества отправителем изображена на рис. 5.17.

В предложенном подходе этап построения маршрута включает подэтапы выбора целевой функции управления маршрутами (многопараметрическая маршрутизация), способа зондирования (локальное зондирование, упреждающее построение нового маршрута, построение маршрутов адресатом и др.), выбора количества маршрутов (одномаршрутная и многомаршрутная передача) и типа маршрутизации (групповая или однопользовательская).

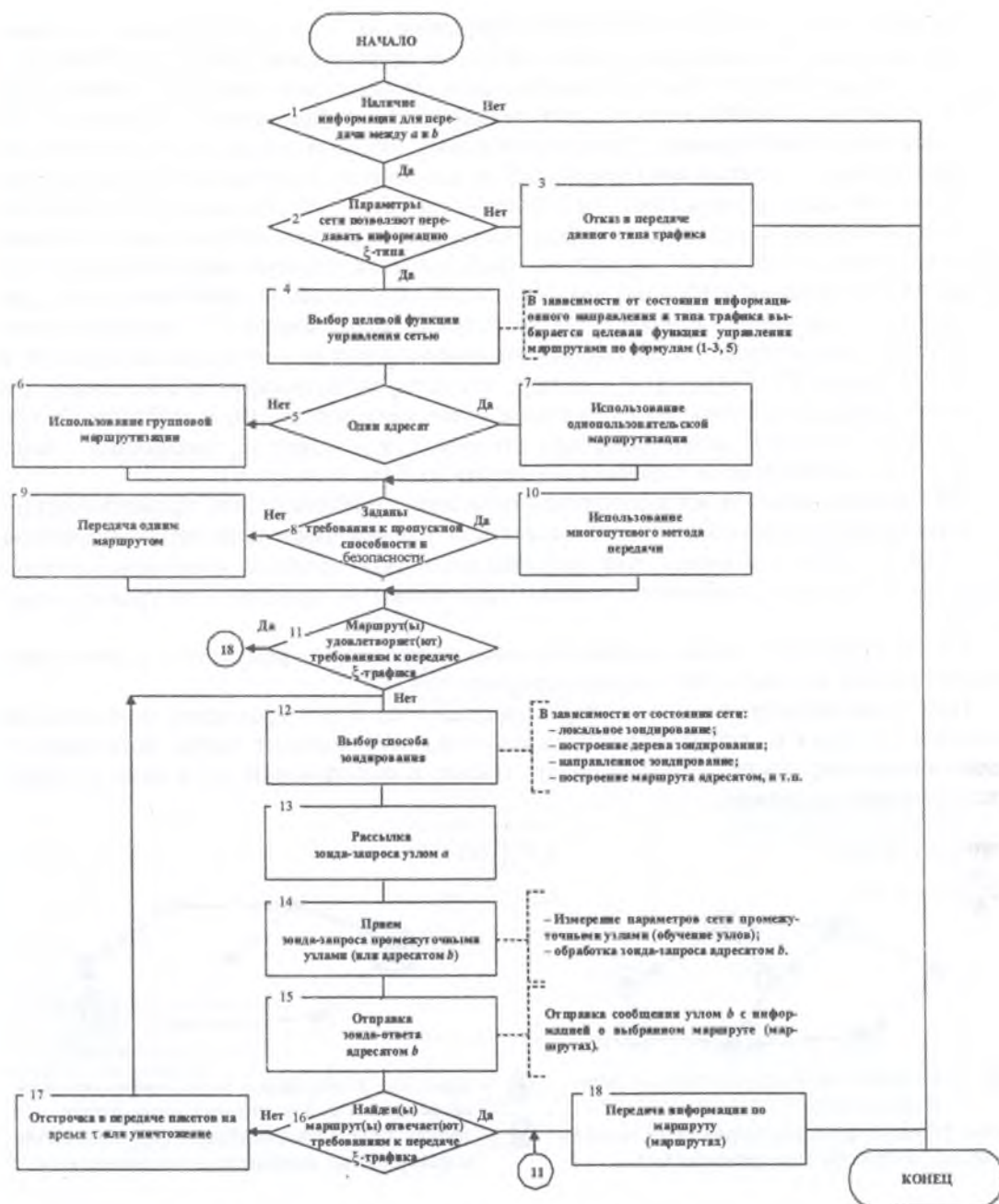


Рис. 5.17. Схема алгоритма поиска маршрута на стороне отправителя

В случае необходимости передачи информации от узла a к узлу b узлом a инициируется запрос к подсистеме управления маршрутизацией (рис. 5.17, блок 2) с целью проверки соответствия параметров сети требованиям трафика, который передается. Запрос обрабатывается подсистемой сбора информации о состоянии информационного направления. Происходит выбор целевой функции y_1 , которая будет определяться с учетом состояния информационного направления и требований к передаче трафика ξ -типа (рис. 5.17, блок 4; рис. 5.18, *a*). Далее проводится поиск маршрутов среди имеющихся в базе маршрутов с учетом требований к передаче трафика ξ -типа (количество адресатов, требования к пропускной способности и безопасности передачи информации). Принимается решение о типе маршрутизации и количестве маршрутов (блоки 5–11). В случае, когда маршрут с необходимыми параметрами содержится в базе знаний, он используется для передачи сообщений к адресату b (блок 18). Если такой маршрут отсутствует, отправитель a начинает поиск нового маршрута путем рассылки всем узлам сети зонда-запроса (блоки 12, 13). Зонд-запрос включает идентификаторы отправителя и адресата, требования к маршруту в виде необходимых параметров (метрик выбора маршрута).

На стороне приемника проводится обработка зонда-запроса, принятие решения о состоянии информационного направления $a-b$ и формирование зонда-ответа (рис. 5.18, *б*). Предполагается, что информация о типе трафика и его объеме получается из заголовков сообщений, которые поступают из прикладного уровня модели OSI.

После получения зонда-ответа отправитель принимает решение о выборе типа маршрутизации и количестве маршрутов (рис. 5.18, *б*).

При функционировании сети через каждый узел будет проходить значительное количество зондов и информационных пакетов, что позволит узлам записывать в память новые маршруты, корректировать старые и использовать их в ходе дальнейшего функционирования.

$$y_1 = f_{y1}(x_1, x_2, x_3, x_4)$$

$$y_4 = f_{y4}(x_1, x_4, x_5)$$



- ⊙ — рассылка зонда отправителем a (параметры x_1-x_7);
 выбор целевой функции управления маршрутами (y_1), и способа зондирования (y_4).

a

$$y_2 = f_{y2}(x_7)$$

$$y_3 = f_{y3}(x_1, x_6)$$



$X = \{x_i(t)\}$

- ⊙ — адресатом b проводится определение состояния направления $a-b$ и отправка зонда-ответа;
 ⊙ — выбор типа маршрутизации (y_2), количества маршрутов (y_3) принимается отправителем a .

б

Рис. 5.18. Этап построения нового маршрута

Если найденные маршруты (рис. 5.17, блок 16) отвечают требованиям к передаче трафика ξ -типа, то отправитель a передает информацию, в противном случае происходит отсрочка передачи пакетов на некоторый промежуток времени τ , после чего процесс поиска маршрута повторяется (блок 17).

В отличие от большинства ММ, которые используются в проводных сетях и учитывают только один параметр при определении кратчайшего маршрута, предложенный метод использует множество метрик поиска маршрута в зависимости от целевой функции управления маршрутами, требований к качеству маршрутов и ситуации, которая сложилась в сети.

Этап поддержания маршрутов. Промежуточный узел k , определив отказ радиоканала (являющегося составной частью активного маршрута для узла a), присылает зонд-отказ узлам a и b . При получении отправителем a или адресатом b зонда-отказа они инициируют процесс создания нового маршрута. Происходит выбор способа зондирования y_4 на основе параметров x_1, x_4, x_5 и прогнозируемого времени существования канала t_{a-b}^{ck} (рис. 5.18, a). Основным условием принятия решения о построении нового маршрута есть неравенство $t_{a-b}^{ck} \leq t_{пл}$, где $t_{пл}$ — время передачи данных в пределах одной сессии.

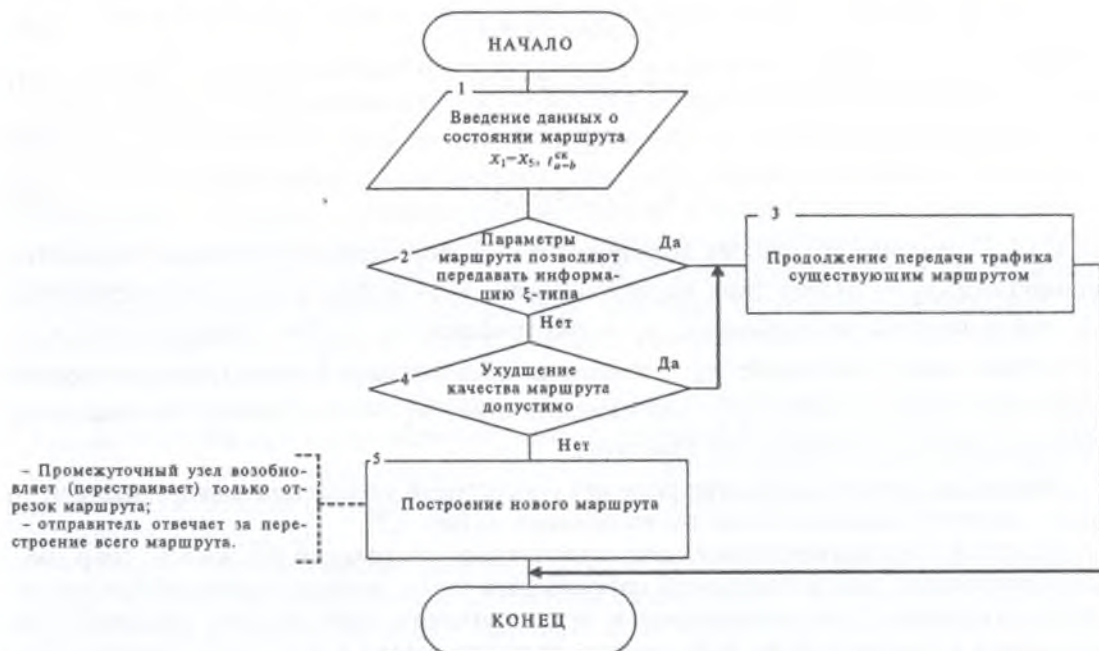


Рис. 5.19. Схема алгоритма поддержания маршрута

В зависимости от ситуации, сложившейся в сети, используются разные способы зондирования. С целью ограничения количества зондов, рассылающихся в сети, применяется локальное зондирование, предусматривающее рассылку зондов в ограниченной зоне сети и построение дерева зондирования. Однако эти способы могут увеличить время построения маршрута при значительном расстоянии к адресату.

В случае, когда при передаче определенного типа информации критическим параметром является время задержки t_3 , возможным решением в данной ситуации есть построение нового маршрута адресатом и использование направленного зондирования. Схема алгоритма поддержания маршрута заданного качества изображена на рис. 5.19.

Математическая модель интеллектуальной системы поиска маршрута. Каждый канал $e = (v_i, v_r) \in E$ и любой узел $v_i \in V$ в момент времени t может характеризоваться вектором параметров $X = \langle x_i \rangle, i = \overline{1, 7}$, вектором фиксированных значений переменных, поступающих на вход нечеткого контроллера узла $v_i \in V$ [12].

Пользовательская (узловая) оптимизация будет достигаться путем выбора целевой функции управления маршрутами, типа маршрутизации, количества маршрутов и способа зондирования. Выражение (5.1) перепишем в следующем виде:

$$U_m(t) = \{y_1, y_2, y_3, y_4\},$$

$$y_1 = f_{y1}(x_1, x_2, x_3), \quad (5.6)$$

$$y_2 = f_{y2}(x_1, x_4, x_5), \quad (5.7)$$

$$y_3 = f_{y3}(x_7), \quad (5.8)$$

$$y_4 = f_{y4}(x_7, x_6), \quad (5.9)$$

где $U_m(t)$ – решение по выбору маршрута; y_1 – выбор целевой функции управления маршрутами; y_2 – выбор типа маршрутизации; y_3 – выбор количества маршрутов; y_4 – выбор способа зондирования; x_1 – тип трафика; x_2 – объем информации; x_3 – остаточная емкость батарей; x_4 – интенсивность потоков ξ -типа (размер очередей в промежуточных узлах); x_5 – мобильность сети; x_6 – обеспечение безопасности информации; x_7 – количество адресатов.

Иерархию процесса принятия решений подсистемой управления маршрутизацией по поиску маршрута заданного качества изображено на рис. 5.20.

Каждый узел осуществляет цикл управления, состоящий из этапов: сбор данных о состоянии узла и состоянии направления связи; анализ и идентификация текущей ситуации в узле-передатчике и сети; принятие управляющих решений и их реализация с целью выбора той целевой функции управления сетью, которая наиболее точно будет отвечать требованиям к передаче того или иного типа трафика и состоянию информационного направления $a-b$.



Рис. 5.20. Иерархия процесса принятия решений по поиску маршрута заданного качества

Анализ и идентификация состояния направления $a-b$ и требований к передаче в узлах. Анализ и идентификация заключается в построении математической модели, которая устанавливает связь между входными (x_1-x_7) и выходными переменными (y_1-y_4) по экспериментальным данным. При идентификации сложных объектов и процессов, к которым относится система поиска маршрута в сетях с динамической топологией, применение классических методов моделирования становится невозможным из-за необходимости использования результатов натуральных экспериментов или статистических данных. Кроме того, система управления мобильной сетью должна владеть свойствами "самообучения" (способность последовательно минимизировать отклонение фактического результата деятельности от некоторого желательного эталона) и лингвистичности (способность выражать естественным языком знания, полученные в результате обучения). Математическим аппаратом, который в отличие от классических методов учитывает эти свойства, есть теория нечетких множеств, имеющая средства формализации натурно-языковых высказываний и логического вывода [12].

Модель системы выбора целевой функции управления, выбора типа маршрутизации, количества маршрутов и способа рассылки зонда строится путем проектирования и настраивания нечетких баз знаний. Минимальное количество параметров базы знаний нечеткой системы управления выбором метрик поиска маршрута, типа маршрутизации, количества маршрутов и способа зондирования приведено в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Переменные	Значения переменных	Примечание
1	2	3
Входные переменные		
x_1 – тип графика, который передается	a_1^1 – видео, a_1^2 – речь, a_1^3 – данные	Четкие заранее запрограммированные значения величин
x_2 – объем информации	a_2^1 – высокий, a_2^2 – средний, a_2^3 – низкий	Четкие значения величин, получаемые из прикладного уровня
x_3 – остаточная емкость батарей	a_3^1 – высокая, a_3^2 – средняя, a_3^3 – низкая	Данные о параметрах получаются с физического, канального и транспортного уровней модели OSI, попадают на вход фаззификатора и превращаются на нечеткие величины
x_4 – размер очередей в промежуточных узлах	a_4^1 – высокий, a_4^2 – средний, a_4^3 – низкий	
x_5 – мобильность сети	a_5^1 – высокая, a_5^2 – средняя, a_5^3 – низкая	
x_6 – обеспечение безопасности информации	a_6^1 – да, a_6^2 – нет	Четкие предварительно запрограммированные значения величин
x_7 – количество адресатов	a_7^1 – один, a_7^2 – много	Четкие значения величин, получаемые из прикладного уровня
Выходные переменные		
y_1 – выбор целевой функции управления сетью	$d_1^1 - S^{a-b}(X) > t_3^{a-b}(X) > p^{a-b}(X) > E_6^{a-b}(X)$; $d_1^2 - t_3^{a-b}(X) > S^{a-b}(X) > p^{a-b}(X) > E_6^{a-b}(X)$; $d_1^3 - p^{a-b}(X) > S^{a-b}(X) > t_3^{a-b}(X) > E_6^{a-b}(X)$; $d_1^4 - E_6^{a-b}(X) > S^{a-b}(X) > t_3^{a-b}(X) > p^{a-b}(X)$	Четкие значения рангов критериев, по которым будет проводиться оценка состояния информационного направления
y_2 – тип маршрутизации	d_2^1 – однопользовательская; d_2^2 – групповая	Четкие значения типа маршрутизации
y_3 – количество маршрутов	d_3^1 – один; d_3^2 – несколько	Четкие значения количества маршрутов
y_4 – способ рассылки зонда-запроса	d_4^1 – локальное зондирование d_4^2 – построение дерева зондирования d_4^3 – направленное зондирование d_4^4 – построение маршрута адресатом	В зависимости от ситуации, сложившейся в информационном направлении, используются различные способы зондирования

Для оценки значений лингвистических переменных x_1-x_7 будем использовать шкалу лингвистических термов a_i^p , которые формируют базу знаний. Каждый из этих термов представляет собой нечеткое множество, заданное с помощью соответствующей функции принадлежности. Как видно из таблицы, только входные переменные x_3-x_5 задаются нечетко, остальные переменные являются четкими значениями параметров, которые получаются из разных уровней модели OSI. С учетом разной природы входных лингвистических переменных, функции принадлежности строятся отдельно для каждой переменной. Однако, с целью обеспечения максимальной скорости выполнения математических операций маломощными процессорами мобильных узлов предлагается использовать параметрические, нормальные, унимодальные, треугольные функции принадлежности [12].

Пользуясь введенными качественными термами и знаниями экспертов, представим соотношения (5.6)–(5.9) в виде табл. 5.3–5.6.

Таблица 5.3

Знания о соотношении (4.16)				
x_1	x_2	x_3	x_4	y_1
a_1^1	a_2^1	a_3^1	a_4^3	d_1^1
a_1^1	a_2^1	a_3^1	a_4^2	
a_1^1	a_2^1	a_3^1	a_4^1	
a_1^1	a_2^1	a_3^2	a_4^3	
a_1^1	a_2^1	a_3^2	a_4^2	
a_1^1	a_2^1	a_3^2	a_4^1	
a_1^1	a_2^2	a_3^1	a_4^3	
a_1^1	a_2^2	a_3^1	a_4^2	
a_1^1	a_2^3	a_3^1	a_4^3	
a_1^3	a_2^1	a_3^1	a_4^3	
a_1^3	a_2^1	a_3^2	a_4^2	d_1^2
a_1^3	a_2^2	a_3^1	a_4^1	
a_1^2	a_2^1	a_3^1	a_4^3	
a_1^2	a_2^1	a_3^2	a_4^3	
a_1^2	a_2^2	a_3^1	a_4^3	d_1^3
a_1^2	a_2^2	a_3^1	a_4^2	
a_1^1	a_2^1	a_3^2	a_4^1	
a_1^2	a_2^1	a_3^2	a_4^1	
a_1^1	a_2^1	a_3^3	a_4^3	d_1^4
a_1^2	a_2^1	a_3^3	a_4^3	
a_1^3	a_2^1	a_3^3	a_4^3	

Таблица 5.4

Знания о соотношении (4.17)	
x_7	y_2
a_7^1	d_2^1
a_7^2	d_2^2

Таблица 5.5

Знания о соотношении (4.18)		
x_1	x_6	y_3
a_1^1	a_6^1	d_3^1
a_1^2	a_6^1	
a_1^3	a_6^1	
a_1^1	a_6^2	d_3^2
a_1^2	a_6^2	
a_1^3	a_6^2	

Таблица 5.6

Знания о соотношении (4.19)			
x_1	x_4	x_5	y_4
a_1^1	a_4^1	a_5^1	d_4^1
a_1^1	a_4^2	a_5^2	
a_1^2	a_4^1	a_5^1	
a_1^2	a_4^2	a_5^2	
a_1^3	a_4^1	a_5^1	
a_1^3	a_4^2	a_5^2	
a_1^1	a_4^3	a_5^3	d_4^2
a_1^2	a_4^3	a_5^3	
a_1^3	a_4^3	a_5^3	

Преобразование системы логических высказываний (табл. 5.3–5.6) в логические уравнения заключается в представлении входных и выходной переменных в виде нечетких множеств. Лингвистические оценки a_i^{jp} переменных x_1 – x_7 , входящие в логические высказывания о решении d_j , рассматриваются как нечеткие числа, определяющиеся на универсальных множествах $X_i = [\underline{x}_i, \bar{x}_i]$, $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$, т.е. осуществляется замена лингвистических оценок a_i^{jp} на функции принадлежности $\mu^{a_i^{jp}}(x)$, $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$.

Вычисление значений исходных переменных y_1 – y_4 проводится с использованием алгоритма идентификации объекта с дискретным входом, который детально описан в [12].

Результаты оценки эффективности разработанного метода маршрутизации показали, что использование интеллектуального метода маршрутизации позволит сократить объем служебного трафика на 20–30 % (благодаря учету состояния информационного направления и требований к передаче разных типов трафика) в сравнении с существующими зондовыми методами маршрутизации.

5.7. Выводы

1. Существующая теория управления сетями связи ориентирована на стационарные или квазистационарные условия их функционирования и не рассматривает вопросы мобильности ее элементов. Поэтому для решения проблемы управления информационными сообщениями в автоматизированных сетях радиосвязи необходимо использование новых теоретических положений управления в самоорганизующихся радиосетях с динамичной топологией.

2. Нами рассмотрена методология решения проблемы управления самоорганизующимися радиосетями. Для этого произведена декомпозиция проблемы (по функциям и уровням эталонной модели) на задачи, определены требования к методам управления в СРС и предложены основные направления решения задач анализа и синтеза управления данными сетями.

3. Показано, что обеспечение заданного качества обслуживания в СРС должно осуществляться по функциям с их реализацией на всех уровнях ЭМ ВОС под управлением выделенной QoS-подсистемы. Система принятия QoS-решения состоит из базы знаний (содержит знания об объекте управления, о целях функционирования и управления, о способах достижения целей), базы данных управления, блока логического вывода и моделей ресурсов сети.

В условиях децентрализованного управления каждый узел будет реализовывать две взаимосвязанные группы целей: пользовательские (достижение заданного качества обслуживания) и сетевые (зоновые) (достижение оптимальных сетевых или зонных показателей эффективности). Каждая проведенная декомпозиция глобальной

цели управления СРС по функциям (по функциональным подсистемам) делится на задачи и реализуется по уровням ЭМВОС.

Задача принятия решения по QoS-управлению СРС сведена к задаче многокритериальной оптимизации для нечетко заданных целей и альтернатив, представленных в виде дерева “цели–методы управления” (вершины обозначают цели, а дуги отображают влияние достижения цели в подцели).

4. Предложенный новый интеллектуальный метод маршрутизации для СРС в отличие от существующих методов зондовой маршрутизации предусматривает:

- введение дополнительных функций маршрутизации, которые реализуются поэтапно: выбор целевой функции управления маршрутами (построение маршрута минимальной (заданной) стоимости по выбранным метрикам), выбор типа маршрутизации, количества маршрутов и способа зондирования сети;

- интеллектуализацию процесса принятия решений по выбору маршрутов передачи данных на основе использования аппарата нечеткой логики. Принятие решения о выборе маршрутов в отличие от существующих методов проводится с учетом состояния информационного направления и требований к передаче различных типов трафика.

5. Интеллектуализация системы управления СРС позволит: оптимизировать процесс управления данной сетью на основе анализа и учета ситуации, сложившейся в сети (информационном направлении), а также требований по передаче определенных типов трафика; минимизировать ошибки, вызванные человеческим фактором в ходе принятия неправильного решения по управлению сети (особенно на этапе инициализации сети); уменьшить затраты времени на сбор и анализ служебной информации о состоянии сети, а также значительно сократить объемы этой информации.

Список литературы

1. Дымарский Я.С., Крутякова Н.П., Яновский Г.Г. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи. — М.: НТЦ “Мобильные коммуникации”, 2003. — 384 с.
2. Гребешков А.Ю. Стандарты и технологии управления сетями связи. — М.: Эко-Трендз, 2003. — 288 с.
3. Мизин И.А., Богатырев В.А., Кулешов А.П. Сети коммутации пакетов. — М.: Радио и связь, 1986. — 408 с.
4. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных: Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 544 с.
5. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Построение сетей интегрального обслуживания. — Л.: Машиностроение, 1990. — 332 с.
6. Арипов М.Н., Присяжнюк С.П., Шарипов Р.А. Контроль и управление в сетях передачи данных с коммутацией пакетов. — Ташкент: Фан, 1988. — 160 с.
7. Шаров А.Н. Автоматизированные сети радиосвязи. — Л.: ВАС, 1988. — 178 с.
8. Олифер В.Г. Компьютерные сети. — СПб.: Питер, 2000. — 672 с.

9. *Минович А.И., Романюк В.А.* Методология оперативного управления мобильными радиосетями // Зв'язок. — 2005. — № 2. — С. 53–58.
10. *Комашинский В.И., Смирнов Д.А.* Нейронные сети и их применение в системах управления и связи. — М.: Горячая линия — Телеком, 2002. — 94 с.
11. *Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В.* Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления: Отв. ред. И.М. Макарова; Отделение информ. технологий и вычислит. систем РАН. — М.: Наука, 2006. — 333 с.
12. *Ротштейн А.П.* Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. — Винница: "УНИВЕРСУМ-Винница", 1999. — 320 с.
13. *Сергеев А.Г., Лычагин С.В., Шибанов В.С.* Средства автоматизированного управления в системах связи. — М.: Радио и связь, 1990. — 232 с.
14. *Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф.* Базы знаний интеллектуальных систем. — СПб.: Питер, 2000. — 384 с.
15. *Романюк В.А.* Класифікація і загальна характеристика задач управління тактичними автоматизованими мережами радіозв'язку // Пр. КВІУЗ. — 1999. — № 4. — С. 3–7.
16. *Haas Z.J., Pearlman R.* Zone Routing Protocol // Internet Draft. — 1999. — P. 125–131.
17. *Романюк В.А.* Волновая маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. — 2003. — № 4. — С. 44–46.
18. *Зайченко Ю.П.* Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах: Учеб. пос. для студентов вузов. — К.: Изд. дом "Слово", 2008. — 344 с.
19. *Akyildiz Ian F., Lee Won-Yeol, Chowdhury Kaushik R.* CRAHNS: Cognitive radio Ad Hoc Networks // Ad Hoc Networks. — 2009. — № 7. — P. 810–836.
20. *Минович А.И., Романюк В.А.* Методы множественного доступа в мобильных радиосетях // Зв'язок. — 2004. — № 2. — С. 46–50.
21. *Doerr C., Neufeld M., Fifield J. et al.* Multimac — an adaptive mac framework for dynamic radio networking // Proc. of IEEE WCNC' 05. — 2005. — P. 548–555.
22. *Zhai H., Wang J., Fang Y.* Distributed Packet Scheduling for Multihop Flows in Ad Hoc Networks // Proc. of IEEE WCNC' 04, 2004. — P. 236–239.
23. *Минович А.И., Романюк В.А.* Маршрутизация в мобильных радиосетях — проблема и пути ее решения // Зв'язок. — 2006. — № 3. — С. 42–50.
24. *Минович А.И., Романюк В.А.* Управление топологией в мобильных радиосетях // Зв'язок. — 2003. — № 2. — С. 28–33.
25. *Минович А.И., Романюк В.А.* Управление энергоресурсом мобильных радиосетей // Зв'язок. — 2004. — № 8. — С. 50–53.
26. *Fu Z., Zerpos P., Gerla M.* The Impact of Multihop Wireless Channel on TCP Throughput and Loss // Proc. of IEEE INFOCOM' 03, 2003. — P. 789–795.
27. *Cordeiro C.M., Das S.R., Agrawal D.P.* COPAS: Dynamic Contention-Balancing to Enhance the Performance of TCP over Multi-hop Wireless Networks // Proc. of ICCCN' 03, 2003. — P. 56–59.
28. *Минович А.И., Романюк В.А.* Управление качеством обслуживания в мобильных радиосетях // Зв'язок. — 2005. — № 8. — С. 17–23.
29. *Минович А.И., Романюк В.А., Шацко П.В.* Выявления атак в мобильных радиомережах // 36. наукових праць ВІПІ НТУУ "КПІ". — 2005. — № 1. — С. 102–111.

30. Zhou L., Haas Z.J. Securing Ad Hoc Networks // IEEE Networks Magazine. – 13, № 6. – 1999. – P. 24–30.
31. Kong J., Luo H., Xu K. et al. Adaptive Security for Multi-layer Ad Hoc Networks // Wireless Communications and Mobile Computing (WCMC), 2002. – P. 426–430.
32. ITU-T G.114. One-way transmission time, 1996.
33. ITU-T G.1010. End use multimedia QoS categories, 2001.
34. Кульгин М. Технологии корпоративных сетей. Энциклопедия. – СПб.: Питер, 2000. – 704 с.
35. Кучерявый Е.А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет. – СПб.: Наука и техника, 2004. – 336 с.
36. Романюк В.А. Архитектура системы оперативного управления тактичными радиомережами // 36. наукових праць ВІСІ НТУУ “КПІ”. – 2009. – № 3. – С. 70–76.
37. Monoparta P., Li J., Gui C. QoS in Mobile Ad Hoc Networks // IEEE Wireless Communication. – 2003. – P. 44–52.
38. Zhu H., Li M., Chlamtac I., Prabhakaran B. A Survey of Quality of Service in IEEE 802.11 Networks // Ibid. – 2004. – N 8. – P. 6–14.
39. Ni Q., Romdhani L., Turletti T. A Survey of QoS Enhancement for IEEE 802.11 Wireless LAN // J. of Wireless Communication and Mobile Computing. – 2004. – 4, issue 5. – 2004. – P. 547–566.
40. Zhai H., Chen X., Fang Y. How Well Can the IEEE 802.11 Wireless LAN Support Quality of Service? // IEEE Transaction on Wireless Communication, 2004. – P. 589–593.
41. Salonidis T. Distributed Dynamic Scheduling For End-to-end Rate Guarantees / Salonidis T., Tassiulas L. // Proc. of МОБИНОС, 2005. – P. 269–274.
42. Model-based Resource Prediction for Multi-hop Wireless Networks / [Novatnack J., Greenwald Sun Y., Gao X., Belding-Royer E.M., Kempf J.] // Proc. of Mobile Ad Hoc and Sensor System (MASS), 2004. – P. 78–88.
43. Chen L., Heinzelman W. QoS-aware Routing Based Bandwidth Estimation for Mobile Ad Hoc Networks // J. on Selected Areas Communication. – 2005. – 23, N 3. – P. 98–105.
44. Chen S., Nahstedt K. Distributed Quality-of-Service Routing in Ad Hoc Networks // IEEE J. on Selected Areas in Communication. – 1999. – 17, N 8. – P. 1488–1505.
45. Ge Y., Kunz T., Lamont L. Quality of Service Routing in Ad Hoc Networks Using OLSR // Proc. of HICSS, 2003. – P. 452–455.
46. Novatnack J., Greenwald L., Arora H. Evaluating Ad Hoc Routing Protocols with Respect to Quality of Service // Proc. of WIMOB, 2005. – P. 569–575.
47. Романюк В.А. Маршрутизация интегрального трафика в мобильных радиосетях // Зв’язок. – 2002. – № 2. – С. 24–27.
48. Романюк В.А. Активная маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв’язок. – № 3. – 2002. – С. 21–25.
49. Gupta R., Musacchio J., Walrand J. Sufficient Rate Constraints for QoS Flows in Ad Hoc Networks // Proc of INFOCOM, 2005. – P. 68–73.
50. Tan H., Zeng W., Boo L., Suda T.A. Unified Frameworks for Topology Management in Multi-Rate Ad Hoc Networks // Proc. WIMOB, 2005. – P. 125–130.

51. *Ueda T., Tanaka S., Sana D.* A Priority-Based Routing for Multimedia Traffic in Ad Hoc Wireless Networks with Directional Antenna Using a Zone-reservation Protocol // *IEICE Trans. Commun.* – 2004. – E-87B, N 5. – P. 34–40.
52. *Olivera R., Braun T.* A Dynamic Adaptive Acknowledgment Strategy for TCP over Multihop Networks // *Proc. of INFOCOM*, 2005. – P. 955–960.
53. *Тоценко В.Г.* Методы и системы поддержки принятия решений: алгоритмический аспект. – К.: Наук. думка, 2002. – 381 с.
54. *Міночкін А.І., Романюк В.А.* Методи прийняття рішень системою управління мобільною радіомережею // *36. наук. праць ВІПІ НТУУ “КПІ”*. – 2006. – № 1. – С. 66–71.
55. *Сова О.Я., Міночкін А.І., Романюк В.А.* Багатошляхова зондова маршрутизація в мережах MANET із динамічним формуванням метрик вибору маршруту // *Зв'язок*. – 2008. – № 2. – С. 42–49.
56. *Johnson D.B., Maltz D.A.* Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks // *Mobile Computing*. – 1996. – P. 153–181.
57. *Міночкін А.І., Романюк В.А., Сова О.Я.* Інтелектуальний метод маршрутизації в мобільних радіомережах // *36. наук. праць ВІПІ НТУУ “КПІ”*. – 2009. – № 1. – С. 88–97.
58. *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.
59. *Катренко А.В., Пасичник В.В., Пасько В.П.* Теория принятия решений. – К.: Изд. группа ВНУ, 2009. – 448 с.

динамической кодовой адаптации, которая вносит при этом больше избыточности в трафик.

7.2. Координатная маршрутизация в I-UWB сетях

Возможность получения в сети IR-UWB координат местоположения узлов с высокой точностью (до сантиметров) позволяет использовать в данных сетях методы координатной маршрутизации [50, 51]. Основным преимуществом данных методов маршрутизации по сравнению с методами, не использующими координатную информацию, является значительное уменьшение объема служебного трафика.

Однако при отсутствии в узлах оборудования позиционирования, например GPS (Global Position System), необходимо будет учитывать *особенности построения системы позиционирования в самоорганизующихся сверхширокополосных радиосетях*:

- наличие определенной задержки построения на построение узлами “карты сети” (время на работу алгоритмов определения местоположения узлов [52] плюс время на распространение координатной информации в сети);

- возможность ошибок в информации позиционирования из-за временного отсутствия связности или изменения топологии сети — поэтому алгоритм маршрутизации должен быть способен строить и поддерживать маршруты в условиях неполной (неточной) координатной информации или ее отсутствия;

- недоступность информации об абсолютной скорости перемещения абонентов, чего требуют некоторые алгоритмы координатной маршрутизации.

При этом методы маршрутизации должны [53]:

- соответствовать особенностям СРС;
- удовлетворять ряду обязательных и/или опционных требований $\{TP_q\}$, $1, \dots, Q$, где, например, TP_1 — децентрализованное функционирование (обязательно); TP_2 — быстрая сходимость и отсутствие закливания маршрутов (обязательно); TP_3 — минимальная загрузка сети служебной информацией (может выступать целевой функцией); TP_4 — получение маршрута по мере необходимости (режим “молчания” сети); TP_5 — обеспечение нескольких маршрутов доставки информации к адресату; TP_6 — обеспечение маршрутов заданного качества (по производительности, задержке и др.); TP_7 — поддержка однонаправленных каналов; TP_8 — минимизация расходуемой мощности узлов, оснащенных батареями; TP_9 — безопасность процессов маршрутизации и др.

При синтезе (выборе) метода координатной маршрутизации необходимо реализовать выполнение данных требований и обеспечить следующие функции (рис. 7.43) [53]: сбор информации о состоянии сети; хранение маршрутов; вычисление маршрута передачи пакета (определение правил выбора одного или нескольких узлов-ретрансляторов). Раскроем данную классификацию более подробно.



Рис. 7.43. Функции методов координатной маршрутизации

Сбор информации о состоянии сети. По охвату контроля состояния сети сбор информации может осуществляться *глобально* (информация о состоянии всей сети) или *локально* в пределах определенного расстояния, выраженного числом $(1, 2, \dots, R)$ ретрансляционных участков.

Тип и *способ* сбора информации о состоянии сети находятся в тесной взаимосвязи.

Волновой (потокковый, (flooding)) способ применяется при сборе всей информации о состоянии сети и вызывает значительный объем служебного трафика, например метод OLSR [53].

Зондовый (reactive) способ осуществляет нахождение маршрута по мере необходимости (обеспечивает “режим молчания”) и предполагает волновую рассылку в сети специальных пакетов (зондов-запросов) и сбор зондов-ответов, содержащих информацию о маршрутах к адресатам (для координатной маршрутизации – информацию о координатах узлов). Представителями методов зондовой некоординатной маршрутизации являются DSR, AODV, ABR, SSR, TORA [53] и другие, среди методов координатной – LAR (Located-Aided Routing) [50, 51].

Проактивный (proactive) или табличный (table-drive) способ предполагает обмен маршрутными сообщениями между соседними узлами (по аналогии с некоординатными табличными методами маршрутизации DARPA PRNET, DSDV, WRP [53]). Каждый узел периодически (или по событиям) информирует (рассылает маршрутные сообщения, содержащие измененные входы маршрутных таблиц) своих соседей о координатах своих соседних узлов. Приняв маршрутное сообщение, узел модифицирует свои входы маршрутных таблиц. Период рассылки $(t_{пр})$ координатных сообщений определяется каждым узлом в зависимости от его мобильности – координатный метод DREAM (Distance Routing Effect Algorithm for Mobility) [50, 51]: ближайшим узлам – $t_{пр} = R_n / (kv)$, где R_n – радиус передачи узла; k – коэффициент; v – скорость перемещения; дальним узлам – $t_{пр} = \text{const}$.

Гибридный способ предполагает, что каждый узел сети собирает информацию о координатах соседних узлов на глубину $R_{мз}$ (маршрутная зона) проактивно, за пределами $R_{мз}$ – зондовым способом [53]. Величина $R_{мз} = f(v)$ варьируется в зависимости от динамики сетевой топологии v . Процесс построения зоны базируется на знании узлом координат своих соседей. Так как корректировка маршрутных таблиц осуществляется локально (в пределах $R_{мз}$), то объем служебного трафика внутри зоны не зависит от размерности сети N , а зависит от размера зоны N_z , степени связности узлов S и интенсивности изменения топологии внутри зоны.

Хранение маршрутов. Общий подход к хранению информации о сети при координатной маршрутизации заключается в поддержании каждым узлом таблицы местоположения следующего формата: идентификатор адресата – j , его координаты – $(x, y)_j$, скорость – v_j , направление перемещения – γ_j , время генерирования данной информации – t_j .

Информация о местоположении узлов может храниться двумя способами: *автономным* или *распределенным*. Первый способ заключается в том, что каждый узел инициирует процесс сбора информации о состоянии сети и хранит ее в своей маршрутной таблице, второй – предполагает назначение определенных узлов, называемых домашними агентами НА (Home Agent), хранящих информацию о местоположении того или иного узла [51]. Роль домашнего агента может выполнять один узел или их совокупность.

В первом случае при изменении своего местоположения узел d информирует узел НА ($НА_d$) о новых координатах (на рис. 7.44 показано пунктирной линией). Передача пакета от узла s к узлу d может осуществляться следующим образом:

- посылка запроса домашнему агенту о местоположении d ($s \rightarrow НА_d$), получение его координат ($НА_d \rightarrow s$), пересылка пакета адресату ($s \rightarrow d$) (рис. 7.44, а);
- пересылка пакета домашнему агенту ($s \rightarrow НА_d$) и он далее адресату ($НА_d \rightarrow d$) (рис. 7.44, б).

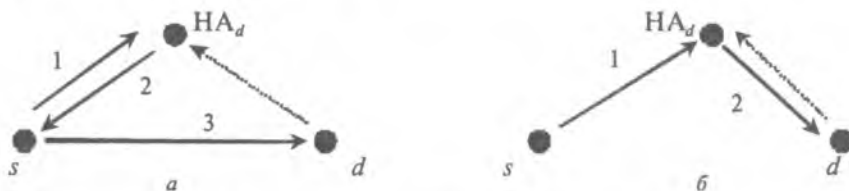


Рис. 7.44. Передача пакетов с использованием узлов-НА

Однако в СРС узлы НА также мобильны и каждый из них может оказаться в несвязной подсети. Поэтому каждому узлу необходимо выбирать несколько узлов НА, причем, желательно, в различных участках сети. С этой целью сеть разбивается на фиксированные географические квадраты (размер квадрата равен примерно

двойному радиусу передачи узла), известные всем узлам сети. Каждому узлу присваивается уникальный идентификационный номер. Информацию о своем местоположении каждый узел хранит в трех узлах НА, которые находятся в смежных одно-, двух- и четырехкратных и далее двухкратных квадратах – метод GLS (Grid Location Service) [52]. Выбор узлов НА для i -го узла (например, узла 17 на рис. 7.45) осуществляется по следующему правилу: узел, имеющий больший идентификационный номер, но ближайший к i в данном двухкратном квадрате, становится домашним агентом. Если такового нет (левый квадрат относительно рассматриваемого), то узел 17 хешируется и в этом случае выбирается узел 2, а не 7. На рис. 7.45 относительно узла 17 домашними агентами будут выбраны следующие узлы: в смежных квадратах – 2, 23, 63; в смежных 2-х кратных квадратах – 26, 31, 43; в смежных 4-х кратных квадратах – 37, 19, 20. Интервал рассылки узлом координатных сообщений своим домашним агентам зависит его скорости и взаимного расстояния (далее НА – реже рассылка).

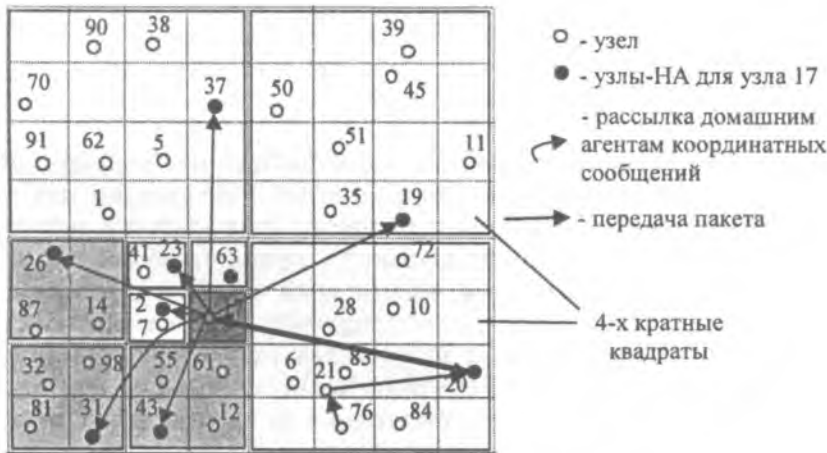


Рис. 7.45. Пример реализации метода GLS

Каждый узел поддерживает две таблицы: координатную таблицу – с информацией об узлах своего однократного квадрата (формируется путем периодического обмена координатными сообщениями с соседними узлами) и таблицу своих домашних агентов (содержит идентификатор НА и его координаты). При необходимости передать пакет узлу 76 для узла 17 (и отсутствии информации о нем в координатной таблице) НА пошлет запрос узлу, находящемуся в смежных квадратах и имеющему идентификационный номер, ближайший к номеру 17, т.е. узел 76 передаст запрос узлу 21 (см. рис. 7.44). Далее аналогично: узел 21 передаст запрос узлу с наименьшим номером в смежные квадраты высшего уровня иерархии (т.е. двухкратные квадраты): 21 → 20. Узел 20 является домашним агентом узла 17 и поэтому

Для сокращения числа передач можно предложить следующие правила:

- введение задержки передачи пакета $t_{\text{зп}}$, определяемую расстоянием до адресата: $t_{\text{зп}i} < t_{\text{зп}j}$, если $r_j < r_i$ (узел, приняв передачу соседа находящегося ближе к адресату, не передает данный пакет);
- введение параметра δ , ограничивающего количество ретрансляторов; если значение δ определяется при каждой ретрансляции пакета, то говорят о динамическом изменении размеров области поиска адресата.

Случайный выбор ретрансляторов в прямоугольной области, определенной отправителем. В передаваемом 33 отправитель s задает область поиска адресата d в виде круга с центром в точке (x_d, y_d) и радиусом $R = v_d(t_1 - t_0)$, где v_d — максимальная скорость перемещения адресата; t_0 — время получения последней корректировки его координат; t_1 — текущее время. Зона рассылки (множество ретрансляторов 33) определяется в виде прямоугольника $sabc$ (рис. 7.47, а) при расположении s за пределами предполагаемого местоположения d или $abcf$ (рис. 7.47, б), когда s находится внутри данной области с координатами (x_s, y_s) в одном углу и координатами круга, определяемого d , в другом.

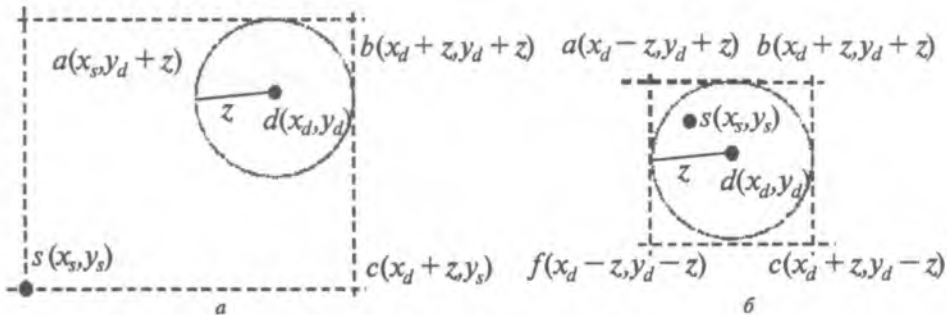


Рис. 7.47. Область выбора ретранслятора задается в виде прямоугольника

Случайный выбор ретрансляторов, находящихся в секторе по направлению к адресату (рис. 7.48). Направление (сектор) передачи определяется следующим образом. Если узлу s известно расстояние r_d до адресата d и максимальная скорость его перемещения v_d , то он может вычислить возможную область его нахождения. Направление поиска задается углом $\alpha = \arcsin(v_d)(t_1 - t_0) / r_d$, где t_1, t_0 — текущее время и время получения координатной информации. Если $z = v_d(t_1 - t_0) > r_d$, то узел может находиться в любом направлении и $\alpha = \pi$. Если известна функция плотности распределения скорости перемещения узла, то можно вычислить заданную вероятность P_H нахождения адресата d в направлении $[\gamma - \alpha, \gamma + \alpha]$:

$$P_H \leq P(z \leq v(t_1 - t_0)) = P(r \sin \alpha \leq v(t_1 - t_0)) = P(v \geq r \sin \alpha / (t_1 - t_0)) = \int_{r \sin \alpha / (t_1 - t_0)}^{\infty} (v) dv.$$

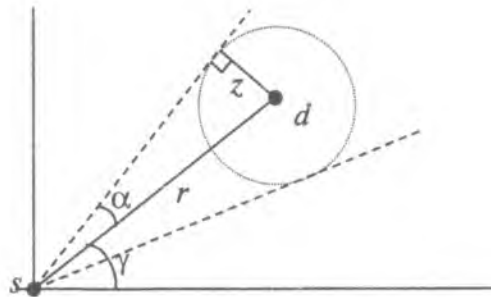


Рис. 7.48. Ретранслятор выбирается в секторе $[\gamma - \alpha, \gamma + \alpha]$

В передаваемом пакете (кроме координат отправителя и адресата) содержится предполагаемое направление нахождения адресата. Если при передаче пакета от узла s к узлу d ретранслятор N_s принадлежит сектору $[\gamma - \alpha, \gamma + \alpha]$, то пакет ретранслируется далее, иначе — он стирается. Каждый узел на пути к адресату определяет новое направление его нахождения (α и γ) и выполняет аналогичные действия.

Фиксированный выбор ретранслятора. Рассмотрим различные правила выбора RT ретранслятора(ов) узлом s , $RT \in N_s$ (рис. 7.49, а) [50, 51]:

- ближайший к адресату GEDIR (GEographical DIstance Routing)

$$RT = \min(|N_s, d|) = h;$$

- в направлении адресата с максимальным продвижением к нему MFR (Most Forward within Radius)

$$RT = \min(|N'_s, d|) = |a', d| = a,$$

где a' — проекция узла a ;

- ближайший к передающему узлу с продвижением к адресату NFR (Nearest Forward within Radius)

$$RT = \min(|s, N_s|) \text{ и } (|s, d| > |N_s, d|) = c;$$

- с минимальным углом в направлении адресата (Compass)

$$RT = \min \langle N_s, s, d = \langle f, s, d = f; \rangle$$

- выбор двух ретрансляторов, расположенных по внешней стороне направленного сектора и ближайших к адресату (V-GEDIR) и др.

В зависимости от объема сбора информации о состоянии сети правила выбора ретранслятора будут аналогичны для узлов, находящихся на расстоянии двух, трех и R ретрансляционных участков. Доказано, что правила выбора ретрансляторов, основанные на уменьшении расстояния к адресату, не вызывают закливания маршрутов передачи информации.

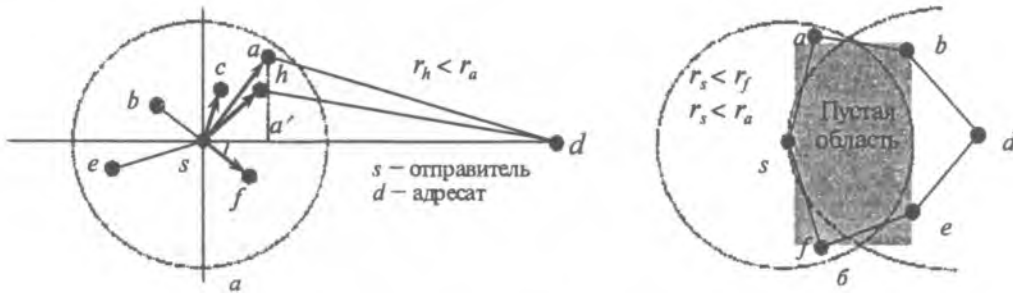


Рис. 7.49. Иллюстрация правил выбора ретранслятора

Однако возможен ряд структур сети, не позволяющих рассмотренным правилам гарантировать доставку пакета адресату. На рис. 7.49, б узел-отправитель s расположен ближе к адресату d , чем узлы a и f . В этом случае применение любого правила, основанного на уменьшении расстояния к адресату, не позволит найти маршрут даже при его наличии: $s-a-b-d$ и $s-f-e-d$. Поэтому для данной ситуации используется правило обхода области без узлов по ее периметру: *при отсутствии ретранслятора, сокращающего расстояние до адресата, выбрать узел $f(a)$, находящийся справа (слева) по (против) часовой стрелке на расстоянии большем, чем отправитель; отметить в передаваемом пакете данный режим передачи (передача по периметру, установив флаг $P=1$) и передать узлу $f(a)$ пакет*. Согласно данному правилу узел s передаст пакет узлу f , который затем установит флаг $P=0$ и передаст пакет далее по ранее рассмотренным правилам выбора ретранслятора.

Применение того или иного правила выбора ретранслятора должно определяться целевой функцией управления данного узла (минимизация времени доставки пакета – стратегия GEDIR, минимизация мощности передач узлов – NFR и т.д.) и реальной ситуацией на сети (динамика топологии, уровень нагрузки и др.) [57].

Многопараметрическая маршрутизация. Кроме данных, определяющих местоположение узлов сети, может потребоваться и ряд других параметров (пропускная способность, время задержки передачи, расход энергии на передачу и др.), определяющих построение маршрута по заданным требованиям к качеству передачи (QoS).

В ряде работ [54–56] предлагается использовать многопараметрическую маршрутизацию с использованием следующих метрик $c_i, i=1, \dots, I$, выбора маршрутов: c_1 – мощность передачи узла; c_2 – наличие синхронизации между узлами; c_3 – уровень взаимных помех (MUI); c_4 – надежность доставки информации; c_5 – уровень трафика; c_6 – задержка передачи и др.

Стоимость маршрута представляется аддитивной сверткой из данных метрик.

Однако необходимо отметить, что вычисление кратчайшего маршрута табличными методами маршрутизации при использовании уже двух метрик относится к

классу NP -полных задач. Поэтому использование множества метрик при табличной маршрутизации будет требовать значительной вычислительной производительности процессора узла, поэтому множество метрик целесообразно использовать при зондовой маршрутизации. При этом для минимизации объема собираемой информации и, соответственно, объема служебного трафика необходимо учитывать состояние сети, внешней среды и самого узла. В этой ситуации целесообразно использовать интеллект — знания о правилах выбора метрик и способах сбора информации о состоянии сети и использовать новый интеллектуальный метод маршрутизации, предложенный в [57].

Ретрансляция пакетов по маршруту. Ретрансляция пакетов по маршруту может осуществляться следующими способами: последовательно (каждый узел имеет право изменять маршрут по своему усмотрению), отправителем (маршрут жестко определяется и фиксируется отправителем), по нескольким маршрутам и направленной волной (при построении маршрутов или для повышения надежности доставки пакетов). Решение по выбору способа ретрансляции должно приниматься соответствующей системой управления каждым узлом сети в зависимости от ситуации на сети и требований трафика [57].

Дополнительные функции. Исследования СРС 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 задачи необходимо ввести иерархическое управление СРС — провести разбиение сети на отдельные зоны (кластеры) с выделением главных узлов зоны, узлов-шлюзов и внутренних узлов [54]. Множество главных узлов и выделенные узлы-шлюзы образуют в сети виртуальную магистраль, которая может использоваться как для распространения маршрутной информации, так и для передачи полезной информации.

В методе GRID [51] предполагается введение иерархии управления в сети, логически разделенной на квадраты, каждый из которых пронумерован (рис. 7.50). 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. Каждый вход координатной таблицы узла содержит номер следующего квадрата к адресату, т.е. маршрут представляет собой последовательность квадратов, а не узлов. Данный способ позволяет уменьшить объем обмена служебным трафиком, но требует реализации алгоритма нахождения и поддержания главных узлов квадратов сети. На рис. 7.50, *a* показано исходное состояние сети, на рис. 7.50, *b* — перемещение узлов *a* и *s* в другие квадраты, выбор новых главных узлов и, соответственно, изменение маршрута передачи пакета.

Эффективность методов координатной маршрутизации может быть проведена по двум группам показателей [53].

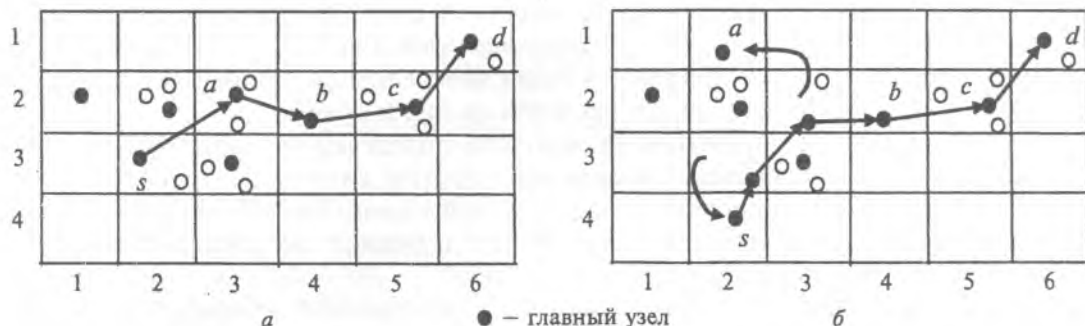


Рис. 7.50. Передача пакета при методе GRID

До сих пор рассматривалось, что топология сети неизменна и маршруты строятся на имеющейся топологии. Однако управление топологией часто дает бóльший выигрыш по сравнению с маршрутизацией. В [58] сделан вывод, что для СРС целесообразно на сетевом уровне эталонной модели взаимодействия открытых систем ввести специальный подуровень управления топологией, работающий совместно с подуровнем маршрутизации.

7.3. Выводы

1. Уникальные свойства импульсных сверхширокополосных сигналов требуют специального подхода к проектированию МАС-уровня, в котором должны быть учтены: невозможность определения известными методами занятого состояния радиоканала и естественная способность сигналов в обеспечении параллельной во времени передачи определенным количеством абонентов в общем радиоканале.

2. Количество одновременных передач в радиоканале ограничено системной интерференцией, а также уровнем шумов многопользовательской интерференции — MUI. Для устранения системной интерференции на МАС-уровне предусмотрены процедуры динамического назначения кодов расширения в условиях превышения количества абонентов в сети над количеством доступных ортогональных кодов. Для снижения MUI используются механизмы ее локального измерения и децентрализованного ограничения на уровне, обеспечивающем заданную вероятность успешной передачи.

3. Использование специального канала управления и процедур резервирования позволяет оценивать параметры радиоканала между корреспондирующими абонентами, отслеживать количество активных абонентов по соседству, уведомлять принимающим терминалом соседние с ним узлы о значении дополнительной шумовой мощности, которую каждый из них может добавить к суммарной MUI, не разрушая текущий прием данных этого терминала, что в итоге повышает пропускную способность сети.