

## **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-



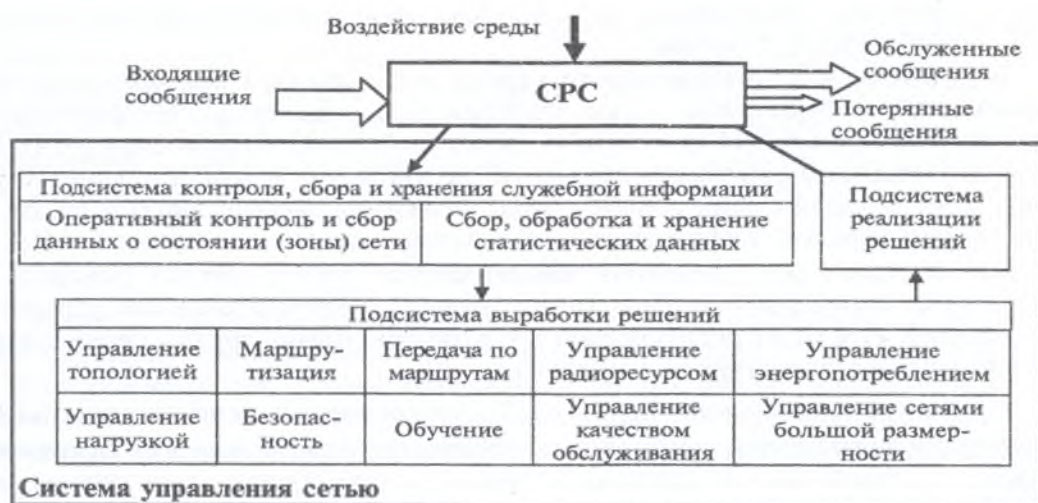


Рис. 5.1. Функциональная модель системы управления CPC

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 CPC 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  $\xi$ -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;  $\omega$  – интенсивность изменения топологии сети;  $\Gamma^\xi(t) = \|\Gamma_{ab}^\xi(t)\| \leq \gamma_{\max}^\xi$  – интенсивность входящих потоков  $\xi$ -типа от  $a$ -го отправителя  $b$ -му адресату,  $\xi = \overline{1, \Xi}$ ;  $s_{ij}$  – пропускная способность канала  $i-j$ ,  $i, j \in n$ ;  $t_3^\xi$  – время задержки передачи пакетов  $\xi$ -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  $\xi$ -типа и состояния информационного направления (5.3) с целью обеспечения заданного качества обслуживания трафика  $\xi$ -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.

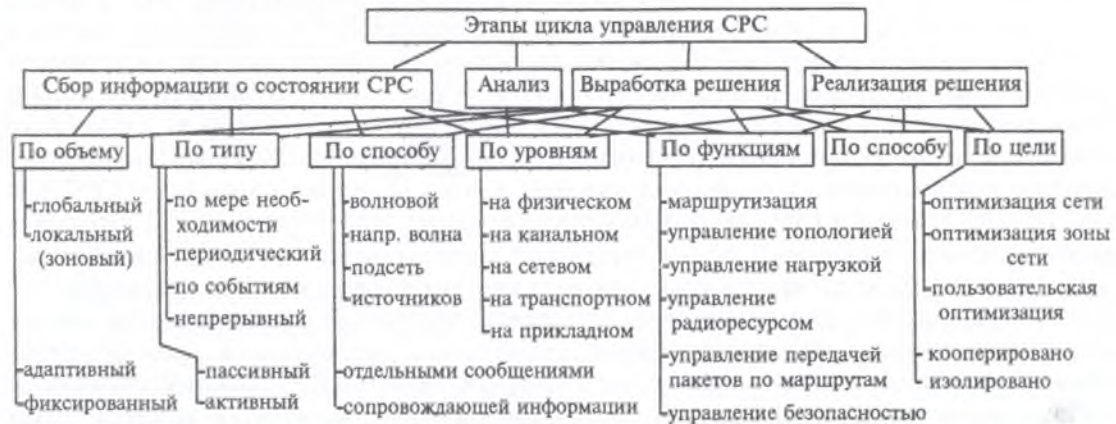


Рис. 5.3. Классификация задач цикла управления СРС по различным признакам

**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).

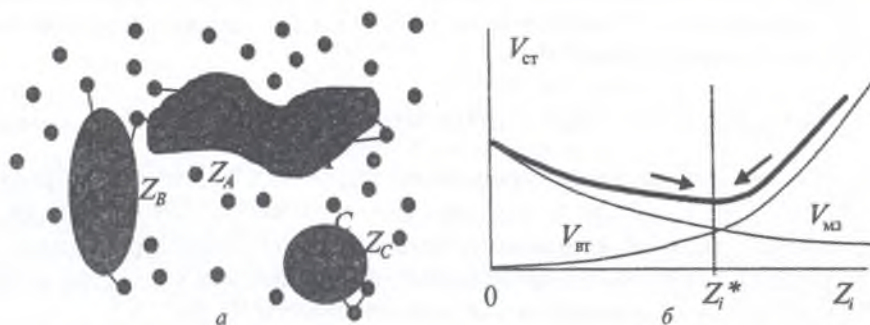


Рис. 5.4. Зоны контроля сети для узлов  $A, B, C$  и оптимизация их размеров

**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.

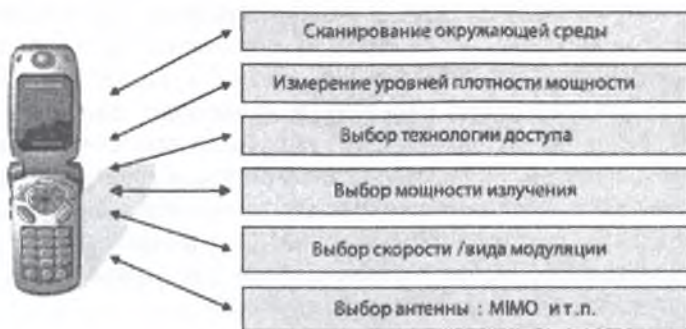


Рис. 5.7. Функции интеллектуальных средств радиосвязи по управлению радиоресурсом

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  $t_3$  (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  $t_3$  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, ТСП). 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).

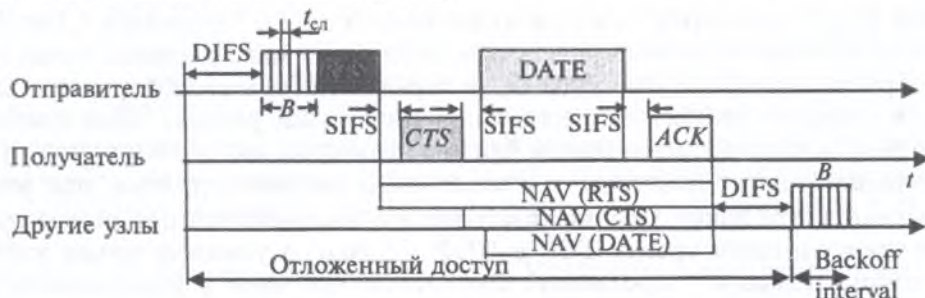


Рис. 5.10. Функционирование протокола IEEE 802.11 в режиме DCF



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  $\alpha$  – случайная величина в интервале  $[0, 9-1, 1]$ ;  $k$  – масштабируемый коэффициент;  $l$  – длина пакета;  $\varphi$  – 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;  $\varphi_i$  – 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 неперіоритетный 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  $\beta_i$ ) 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).

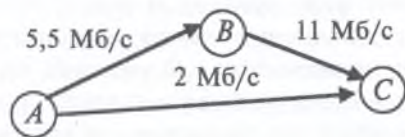


Рис. 5.12. Пример разноскоростной передачи в СРС

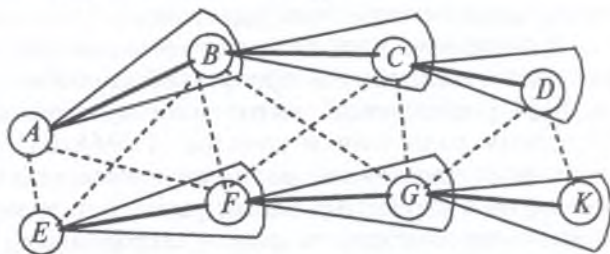


Рис. 5.13. Пример построения независимых маршрутов в СРС

### 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).

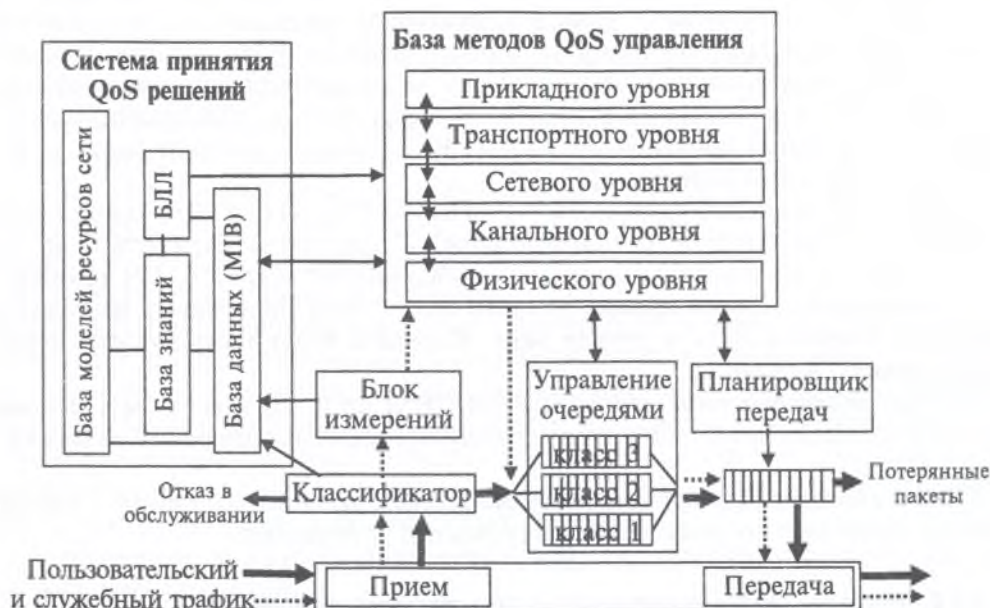


Рис. 5.14. Архитектура QoS в системе управления СРС

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  $t_{\text{пд}}$  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.

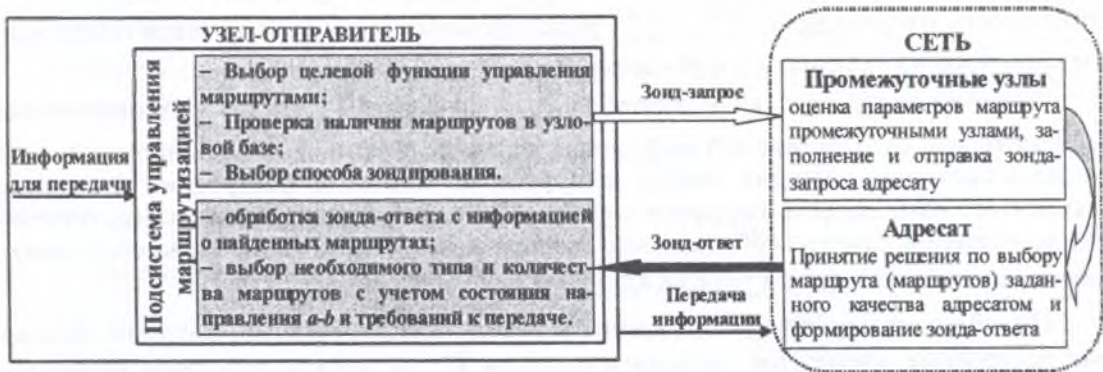


Рис. 5.15. Схема взаимодействия узлов сети при зондовой маршрутизации

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  $\xi$ -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  $\xi$ -типа и состояния информационного направления (5.5) с целью обеспечения заданного качества обслуживания трафика  $\xi$ -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  $\Delta_1$  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  $\Delta_2$  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.

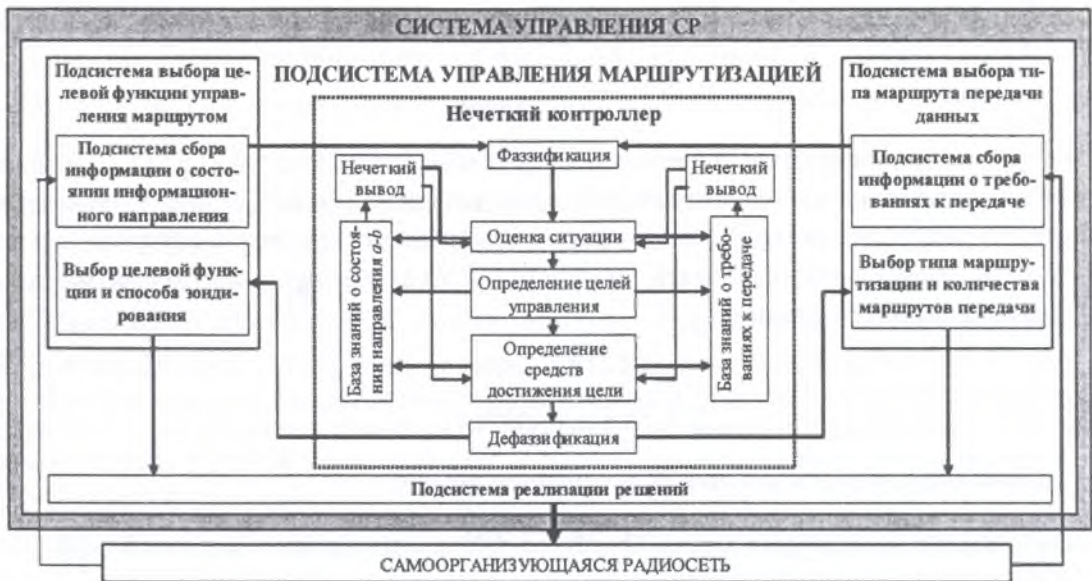


Рис. 5.16. Нечеткий контроллер в подсистеме управления маршрутизацией

**Этап построения маршрутов.** На данном этапе узел выполняет две основные функции: поиск маршрутов (отвечающих требованиям к передаче  $\xi$ -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).

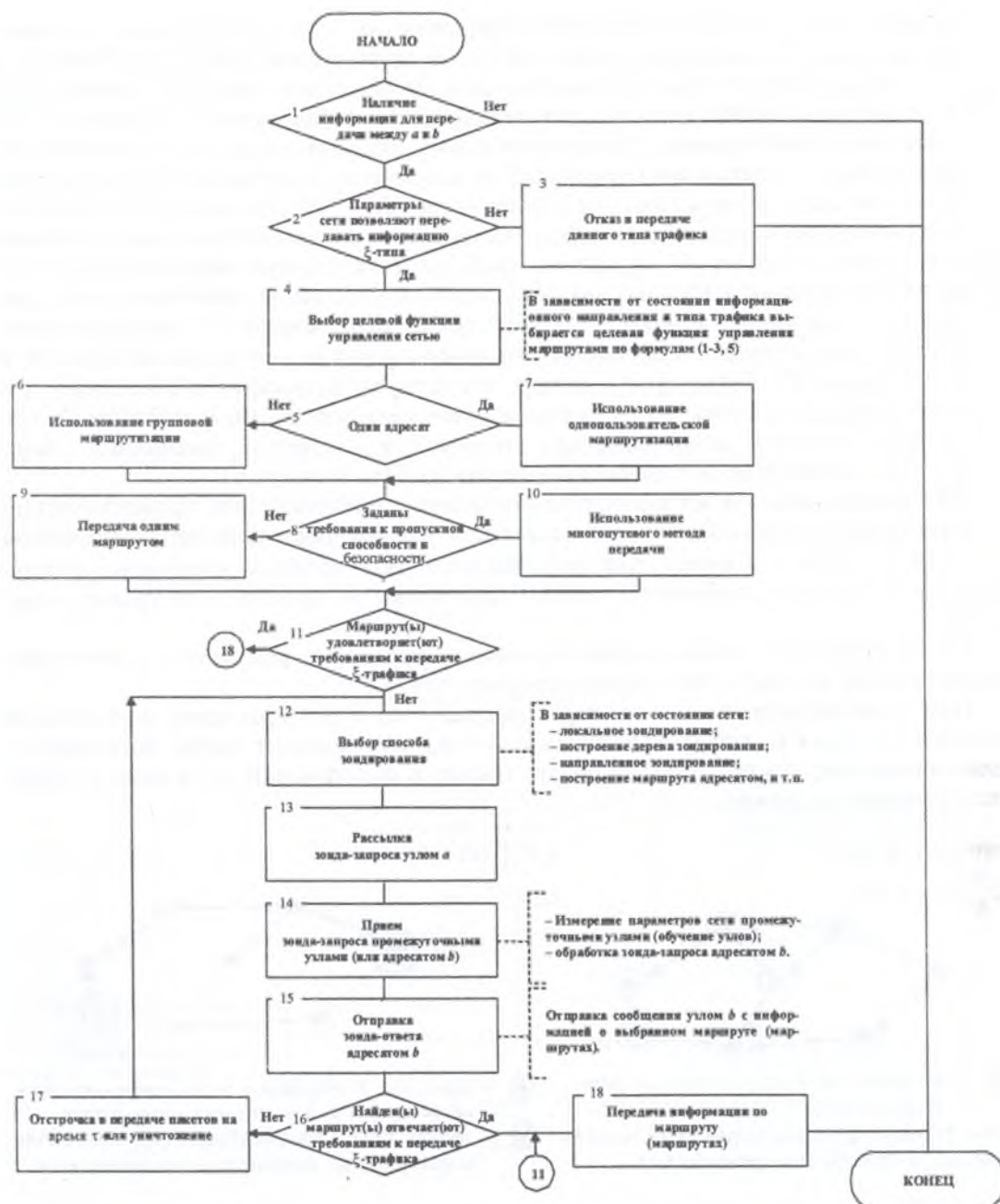


Рис. 5.17. Схема алгоритма поиска маршрута на стороне отправителя



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  $\xi$ -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  $\xi$ -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*

$$y_2 = f_{y2}(x_7)$$

$$y_3 = f_{y3}(x_1, x_6)$$



- ◎ — 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  $\xi$ -типа, то отправитель  $a$  передает информацию, в противном случае происходит отсрочка передачи пакетов на некоторый промежуток времени  $\tau$ , 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.

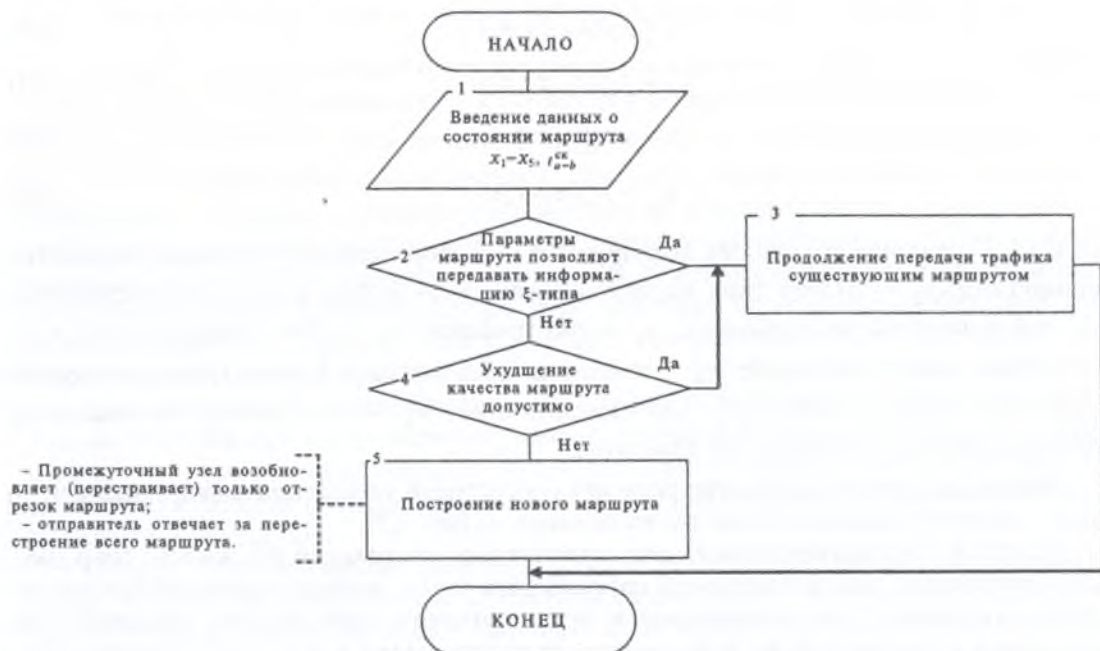


Рис. 5.19. Схема алгоритма поддержания маршрута



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  $\xi$ -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 динамической 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. *Серегин 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., Tassioulas 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., Скрытник 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.