

## МЕТОДОЛОГИЯ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РАДИОСЕТЯМИ

Рассматривается динамическая архитектура построения мобильных радиосетей (МР), предполагающая отсутствие базовых станций и фиксированных маршрутов передачи информации (так называемые сети MANET – Mobile Ad-Hoc Networks) [1]. Все узлы сети мобильны и обмениваются информацией непосредственно между собой или применяют ретрансляцию передаваемых пакетов. Под узлом сети понимается терминал (переносной компьютер, персональный секретарь, сенсорное устройство, робот и др.), оснащенный приемопередатчиком и реализующий функции маршрутизатора. Применение МР охватывает сферы как военного (сети тактического звена управления [2], беспроводные сети пунктов управления), так и гражданского назначения (чрезвычайные ситуации и стихийные бедствия; дом и офис; проведение выставок, конференций, олимпиад и т.п.; сенсорные сети, гибридные сотовые / мобильные радиосети). Коммерческую привлекательность МР получили с появлением недорогих беспроводных сетевых решений (стандарт IEEE 802.11 Wireless Ethernet, технологии HiperLAN 2, Bluetooth) [3], использующих нелицензионные полосы частот (для большинства стран мира) в диапазонах 2,4 или 5,1 ГГц.

Мобильные радиосети характеризуются:

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

Узлы данной сети должны быстро адаптироваться к частым изменениям топологии и эффективно использовать ограниченные сетевые ресурсы. В таких условиях обеспечить информационный обмен с заданным качеством невозможно без эффективной системы управления (СУ) сетью.

Анализу и синтезу методов управления сетями связи посвящено значительное количество работ [4 – 9]. Однако существующие современные технологии управления телекоммуникационными сетями [9 – 11] рассчитаны на статичные или квазистатичные условия их функционирования и не учитывают особенности МР. Например, технология TMN (Telecommunication Networks Management) является централизованной, для управления телекоммуникационной сетью используется выделенная сеть управления, построена на технологии “агент-менеджер” с низкой степенью автоматизации процессов управления.

В то же время основными отличиями систем управления МР от стационарных сетей являются:

- Различные цели управления, требования к качеству и оперативности принимаемых решений. Управление МР имеет более сложные задачи и жесткие требования к оперативности и качеству принимаемых решений.
- Различная архитектура систем управления сетями. Архитектура системы управления МР должна реализовывать полностью децентрализованное (распределенное) управление.
- Отсутствие выделенной сети передачи управляющей информации.
  - Особенностями системы управления МР являются:
    - 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 МР и внешних воздействий.

В тоже время к системе управления МР предъявляются следующие основные требования  $\{TR_q\}$ ,  $q = \overline{1, Q}$ : обеспечение засекреченной 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 [12] определены основные принципы управления МР, к которым можно отнести: адаптивность, функциональность, распределенность, координация взаимодействия, иерархичность, оптимальность и автоматизация. Предложена функциональная модель системы оперативного управления сетью с выделением следующих основных подсистем: контроля, сбора и хранения информации о состоянии сети, выработки решений (по топологии, маршрутизации и т.д.) и реализации решений (рис. 1).

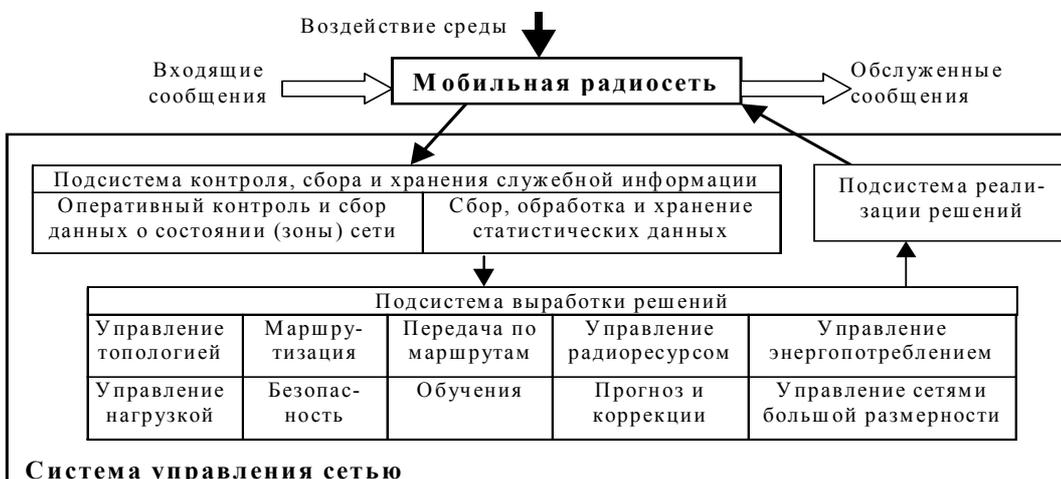


Рис. 1. Функциональная модель системы управления МР

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* [7]. Она зависит как от динамики топологии сети, тяготений потоков сообщений, требований к качеству их обслуживания, так и в значительной мере от эффективности управления сетью. 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 максимальную пропускную способность (целевое состояние).

При этом одним из основных противоречий является противоречие между реальным составом информации об управляемых и неуправляемых характеристиках МР 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. Например, формально задача максимизации пропускной способности сети  $S$  может быть записана в следующем виде

$$U^*(t) = \arg \max_{U(t) \in \Omega} S(\Gamma^\xi(t), v(t), N(t), \mathbf{E}^\delta(t), U(t)) \quad (1)$$

при ограничениях  $\Omega$ , накладываемых на выбор управления

$$\Omega = \{t_{п}^\xi(U(t)) \leq t_{пдоп}^\xi, r(U(t)) \leq r_{\max}, U(t) \in \{TP_q\}, q = \overline{1, Q}\} \quad (2)$$

и ограничениях на ресурсы сети

$$e_i^\delta(t) \leq e_{i\max}^\delta, v_i(t) \leq v_{i\max}, s_{ij}(t) \leq s_{ij\max}, n_k \leq n_{k\max}, N(t) \leq N_{\max}, \quad (3)$$

где  $U(t) = \langle U_l(t) \rangle$  – управление, реализующее  $l$ -ю функцию управления;  $t_3(U(t)) = (t_{п1}(U(t)), \dots, t_{пm}(U(t)))$  – вектор средних времен передачи пакетов между  $m$  корреспондирующими парами абонентов;  $\Gamma^\xi(t) = \|\gamma_{ik}^\xi(t)\| \leq \gamma_{\max}^\xi$  – интенсивность входящих потоков  $\xi$ -типа от  $i$ -го отправителя  $k$ -му адресату;  $v(t) = [0 \dots v_{\max}]$  – интенсивность изменения топологии сети;  $\|v_i(t)\|$  – мобильность узлов;  $\mathbf{E}^\delta(t) = \|e_i^\delta(t)\|$  – емкости батарей узлов;  $s_{ij}$  – пропускная способность канала  $(i, j)$ ;  $i, j, k \in V$ ,  $|V| = N$  – множество узлов сети,  $r$  – радиус передачи,  $n_k$  – общее количество каналов двумя узлами.

Однако в условиях децентрализованного управления и наличия противоречия между оптимальной информированностью управляющего объекта и своевременностью управляющих воздействий нельзя говорить о глобальной оптимизации [13].

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 (зоновых) ресурсов на ее осуществление. Поэтому в условиях децентрализованного управления МР каждый узел будет реализовывать две взаимосвязанные группы целей, определяющих многокритериальность управления:

- *пользовательские цели*  $\{\Pi_{pi}\}$ ,  $i=1 \dots k$ , определяющие поиск экстремума или выполнение ограничений по передаче сообщений (*пользовательская оптимизация*). Например,  $\Pi_{п1}$  – выполнение требования по оперативности ( $t_{пab} \leq t_{доп}$ ) или  $\Pi_{п2}$  – минимум времени передачи ( $\min t_{пab}$ ),  $\Pi_{п3}$  – маршрут заданной пропускной способности ( $s_{ab} \geq s_{доп}$ ), по безопасности  $\Pi_{п4}$  – заданное количество независимых маршрутов передачи ( $M_{ab} \geq M_{доп}$ ) и др.;
- *сетевые (зоновые) цели*  $\{\Pi_{cj}\}$ ,  $j=1 \dots m$ , реализующие поиск субоптимальных решений сети или ее зоне (*сетевая оптимизация*). Например,  $\Pi_{c1}$  – минимизация служебного трафика ( $\min V_{ст}$ ),  $\Pi_{c2}$  – максимизация пропускной способности ( $\max S$ ),  $\Pi_{c3}$  – минимизация времени передачи сообщений ( $\min t_{п}$ ),  $\Pi_{c4}$  – минимизация мощностей передач узлов ( $\min \bar{P}$ ) и др.

Наличие множества различных и противоречивых критериев оптимальности МР 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 компонент векторного критерия оптимальности.

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 [14, 15]. Основным элементом НСУ является база знаний, состоящая из следующих компонентов [16]:

- ◆ *знания об объекте управления* (совокупность фактов о составе и структуре МР, описываемых в виде множества понятий, отношений между ними и правил, отражающих закономерности управления),
- ◆ *знания о целях функционирования и управления* (структура целей управления и правила целеопределения позволяют 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* (правила 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 способа достижения поставленной цели и реализация выбранного способа достижения цели (рис. 2).

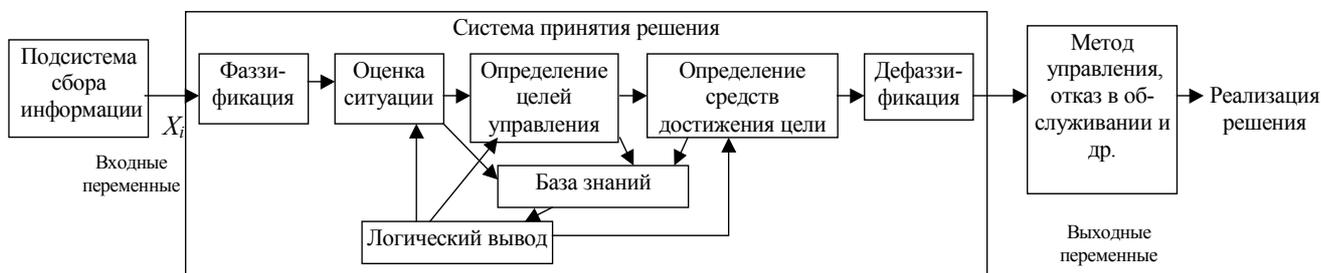


Рис. 2. Схема нечеткой системы управления узлом сети

Оперативное управление представляется как управление с обратной связью и предполагает следующие этапы  $U = \{U^c, U^a, U^b, U^p\}$  (рис. 3):

- $U^c$  – сбор информации о состоянии сети (решение о объеме, частоте, глубине способе сбора информации необходимо принимается на последующих этапах);
- $U^a$  – анализ данной информации: идентификация ситуации в сети (ее зоне и в самом узле), проверка выполнения сетью своих функций и определение необходимости управляющего воздействия;
- $U^b$  – 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.).

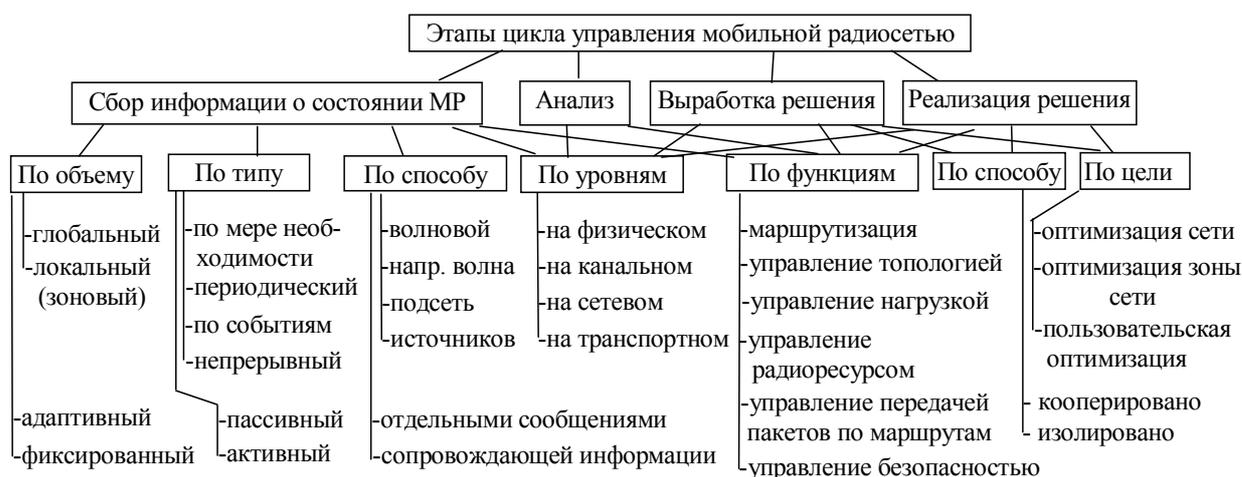


Рис. 3. Классификация задач цикла управления МР по различным признакам

Процесс управления может быть представлен совокупностью функций управления. В свою очередь каждая функция может быть разделена на отдельные задачи управления. Перечень задач управления МР и их классификация представлены в [17]. Количество и конкретные задачи оперативного управления определяется характеристиками и условиями функционирования сети, а также принятыми технологическими решениями на этапе ее проектирования.

**1. Сбор информации о состоянии сети.** Контролируемая информация включает в себя параметры, которые описывают модель узла (сети или ее зоны). База данных управления (Management Information Base, MIB) должна поддерживаться в актуальном состоянии и может быть формализована следующими основными параметрами  $X_i$  ( $i = 1 \dots L$ ), разбитыми на группы [18]:

- *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 – способ модуляции, соотношение сигнал/шум, вероятность ошибки; канального – 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, оставшаяся емкость аккумуляторной батареи, размерность сети и др.

Методы сбора информации можно классифицировать: *по объему* – глобальный и локальный (зоновый), 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 информацией (рис. 3).

Различные функции (уровни) управления (рис. 3) 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* [4 – 11] *не приемлемы в МР*, т.к. требуют знания глобального контроля сети, что невозможно в МР. Поэтому необходим поиск решений пользовательской оптимизации при минимизации ресурсов сети на их получение в условиях неполной информации о 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  $R$ -зоновый гибридный (таблично/зондовый) метод маршрутизации [19]. Данный метод предполагает выделение каждым узлом маршрутной  $R$ -зоны (где  $R$  – число ретрансляций) и аккумулирует достоинства 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*, *спо-*

соб, тип и алгоритм рассылки и сбора узлом служебной информации будут определяться его целью управления, ситуацией на сети и типом передаваемой информации.

Поэтому 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 [20].

Примеры зон  $Z_i = f(v, \gamma, U_i)$  для узлов  $A, B, C$  и нахождение оптимального значения  $Z_i^*$  показаны на рис. 4а и 4б (общий объем служебного трафика  $V_{ст} = V_{вт} + V_{мт}$ , где  $V_{вт}, V_{мт}$  – объемы внутризонального и межзонального служебного трафиков).

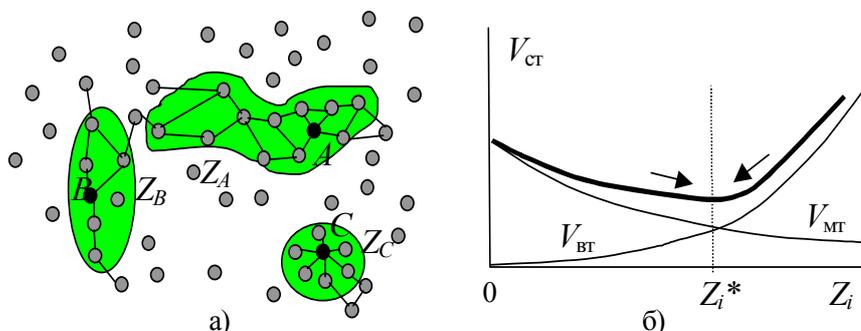


Рис. 4. Зоны контроля сети для узлов  $A, B, C$  и оптимизация их размеров

**2. Анализ состояния сети** заключается в: оценке каждым узлом параметров функционирования сети ( $Z$ -зоны, самого узла) и ее идентификация, установлении соответствия требованиям информационного обмена, определение цели управления и в выявлении необходимости управляющих воздействий. Математическим аппаратом, осуществляющим идентификацию состояния сети в условиях ее неполной информации, может служить теория нечетких множеств [14, 15]. 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.

**3. Выработка решений** осуществляется по функциям управления (на различных уровнях и различными способами рис. 2) 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 на проектирования строится дерево целей. Результатом такой структуризации является граф “цели – средства”, вершинами 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 [16]:

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

где  $Ц_0$  – основная цель системы управления,  $Ц_{ij}$  –  $j$ -я подцель  $i$ -го уровня на целевой структуре,  $i = 1 \dots k, j = 1 \dots n$ ;  $R$  – 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.



Рис. 5. Фрагмент целевой структуры узла сети

4. **Реализация решений** 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 определяется принятыми и реализованными на этапе проектирования коммуникационными технологиями, а также условиями функционирования сети.

Рассмотрим реализацию функциональных подсистем системы управления МР (рис. 1) на различных уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем.

1. **Управление радиоресурсом (канальный уровень).** В радиосети пространство, частота, код и время – четыре основные составляющие, определяющие разделение общего ресурса радиоканала. Метод доступа (МД) устанавливает правила, которые позволяют делить канал между несколькими пользователями. Анализ методов доступа [3, 5, 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), требуя однако при этом решения задач временной синхронизации и ди-

намического распределения слотов между узлами. При генерации злоумышленником ложного трафика эффективен метод случайного доступа типа АЛОНА.

В [21] показано, что единого метода доступа в МР 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 использование множества МД. Применение конкретного метода доступа будет определяться параметрами информационной нагрузки, текущей целью управления сетью, ситуацией на сети (ее зоне) и принятыми решения на других уровнях эталонной модели. Решения по использованию конкретного метода (в условиях отсутствия полной информации о состоянии сети) будет принимать НСУ. [14, 15].

**2. Управление нагрузкой и маршрутизацией (сетевой уровень).** Управление нагрузкой делится на управление доступом пакетов в сеть (применимы известные подходы [5, 7, 9]) и ее распределение по маршрутам передачи. Особенности МР определяют ключевые требования к методам маршрутизации (многие из которых носят противоречивый характер): распределенное (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. [22, 23].

В настоящее время для использования в МР предложено большое количество методов маршрутизации [22, 23]. Каждый из них обладает достоинствами и недостатками, расходует различное количество временных, связных и вычислительных ресурсов на построение маршрута, имеет особенности в реализации. Поэтому на этапе проектирования необходимо определить множество методов маршрутизации для рассматриваемой МР. Для достижения пользовательской и/или сетевой оптимизации необходимо использовать “активную” маршрутизацию [18], которая предполагает: выбор эффективного метода из имеющегося множества с учетом условий функционирования сети; динамическое формирование метрик выбора маршрута; управление топологией сети как составной частью маршрутизации в МР и интеллектуализацию процессов принятия решения по маршрутизации.

**3. Управление 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 увеличению вероятности успешной передачи пакетов, увеличению скорости передачи в канале, снижению времени их передачи  $t_n$  (меньше число ретрансляций), сокращению объема служебного трафика  $V_{ст}$  (уменьшение диаметра сети). Однако 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  $t_{п}$  и  $V_{ст}$ , а также может привести к разделению сети на несвязные компоненты.

Таким образом, для повышения эффективности функционирования МР необходимо осуществлять оперативное управление топологией сети (создавать потенциальные маршруты передачи информации) и далее осуществлять управление построением и поддержанием маршрутов при полученной топологии [24].

**6. Управление 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 уровня соотношения сигнал/помеха, вероятности ошибки на бит и др.).

-на канальном – реализацией энергосберегающих протоколов, предусматривающих режим “пассивного” квитирования (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 – выбор маршрутов по свертке метрик: мощность передачи узла сети  $p_i$  и оставшаяся ёмкость аккумуляторной батареи  $e_i^b$ .

**6. Управление передачей по маршрутам (транспортный и сетевой уровни).** Для МР характерны потеря части пакетов в процессе их передачи, временные задержки из-за необходимости построения (перестроения) маршрутов, что требует совершенствования механизмов функционирования протокола транспортного уровня (в частности, ТСР). Для этого предлагается процесс межконцевой передачи пакета по маршруту разбить на участки с введением управления на каждом из них [26, 27]. Кроме этого передача различных типов трафика (речь, видео/аудио, данные, интерактивные приложения и т.п) требует гарантированного качества обслуживания (Quality and Service, QoS). 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 МР 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 [28]. Кроме того, для обработки разных типов трафика в узлах необходимо введение управления буферной памятью, механизмов поддержки приоритетов и др. [29].

**7. Управление безопасностью.** Узлы сети функционируют в общей радиосреде и поэтому они уязвимы для потенциальных атак противника. Результатами деструктивных действий на МР могут стать как прослушивание (сканирование) трафика, так и полная дезорганизация ее работы.

Атаки, направленные сеть, классифицируются как: *внешние* и *внутренние*, *активные* и *пассивные*. Защита от внешних атак включает шифрование передаваемой маршрутной информации и обеспечение различных сервисов безопасности. 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 о 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.

Пассивные атаки осуществляются путем прослушивания радиоэфира и сбора маршрутной информации с целью вскрытия топологии сети и способов ее адресации. Они не нарушают нормальную работу протоколов обмена, но их почти невозможно обнаружить. Активные атаки направлены на частичную или полную дезорганизацию работы сети путем ввода в сеть повторной (устаревшей) или ложной (измененной) маршрутной информации. Например, атака типа “отказ в обслуживании” (DoS – Denial of Service) может быть легко реализована модификацией одного или нескольких полей маршрутного зонда: адреса отправителя (spoofing), числа ретрансляций, номера сообщения и самого маршрута передачи. Результатами активных атак (например, на маршрутизацию) могут быть: перенаправление маршрутов, их зацикливание, создание перегрузки в узлах, переполнение маршрутных таблиц, имитация разделения сети на отдельные подсети, увеличение времени доставки сообщений и т.д. Защита от активных атак должна предусматривать аутентификацию и целостность маршрутной информации.

С криптографической точки зрения МР 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.

**8. Управление сетями большой размерности.** Интенсивность служебного трафика зависит от размерности сети  $N$ , интенсивности ее топологических изменений  $\nu$  и определяется величиной  $N^2\nu$  (при глобальном контроле). Теоретические исследования [32] показали, что пропускная способность узла  $s_y$  МР ограничена величиной  $\Theta(W / \sqrt{N \log N})$ , где  $W$  – скорость передачи узла (бит/с). При значительном увеличении  $N$  значение  $s_y \rightarrow 0$ . Очевидно, что для решения этой проблемы необходимо ввести иерархическое управление сетью – провести разбиение МР на от-

дельные зоны (кластеры) с выделением главных узлов зоны (ГУЗ), узлов-шлюзов и внутренних узлов. Множество ГУЗ и выделенные узлы-шлюзы образует в сети виртуальную магистраль, которая может использоваться как для распространения служебной информации, так и для передачи информационных сообщений. В качестве ГУЗ могут выступать как выделенные узлы (например, энергонезависимые узлы) так и любой мобильный абонент.

Очевидно, что иерархическая организация МР позволит:

- увеличить стабильность сетевой топологии (динамика изменения зоны сети значительно ниже динамики изменения связности для отдельных узлов сети);
- многократно использовать частотный (кодовый) радиоресурс за счет его пространственного разнесения;
- повысить эффективность управления сетью за счет уменьшения объема служебного трафика.

Однако иерархическая организация сети усложняет процесс управления сетью и требует решения следующих задач [33]: динамическое создание и поддержание зон сети; динамическая адресация абонентов; внутрizonовая и межzоновая маршрутизацию пакетов; восстановление управления зоной вследствие отказа (уничтожения) ГУЗ.

**9. Управление гибридными мобильными/сотовыми сетями.** Пользователю МР будет необходим доступ к стационарной сети. Это требует наличия функций управления “мобильностью”, которые позволят поддерживать доступ к стационарной сети для терминалов, находящихся от нее “на расстоянии” нескольких ретрансляций.

В современных сетях сотовой связи мобильность узлов (пользователей) поддерживается, в основном, средствами переадресации с использованием технологии домашних агентов [3]: при перемещении пользователя вне своей домашней сети, все поступающие к нему вызовы будут переадресованы в гостевую (чужую) сеть через его домашнюю сеть. Такие же принципы переадресации применяются в сетях сотовой связи на базе IP-протоколов. Следует отметить, что данный подход в МР не применим, поскольку все узлы в МР могут перемещаться, и вся идеология заключается в использовании устройств, которые одновременно служат как маршрутизаторами, так и хост-узлами. Следовательно, в МР управление мобильностью будет осуществляться непосредственно протоколом маршрутизации.

**10. Управление неоднородными сетями.** Различная мощность узлов сети приводит к асимметричности радиоканалов, что требует наличия специальных протоколов обмена. Например, для сетевого уровня предложены методы асимметричной маршрутизации [34].

**11. Аппаратная и программная реализуемость.** Конкретный перечень задач управления определяется назначением МР и характеристиками узлов сети (например, принятыми технологическими решениями: применение кодового разделения каналов; наличие направленных антенн, мультимедийной и координатной систем и др.).

В ближайшей перспективе необходимо говорить о создании “программируемых сетей”, т.е. алгоритмы управления реализуется программно в узлах сети. Возможность их реализации будет определяться характеристиками аппаратно-

программных средств. Уже сейчас в архитектуре узла предусматривается наличие баз данных и знаний, электронной карты местности и др. (рис. 6). А в ближайшей перспективе – применение технологии распределенных интеллектуальных агентов [35].

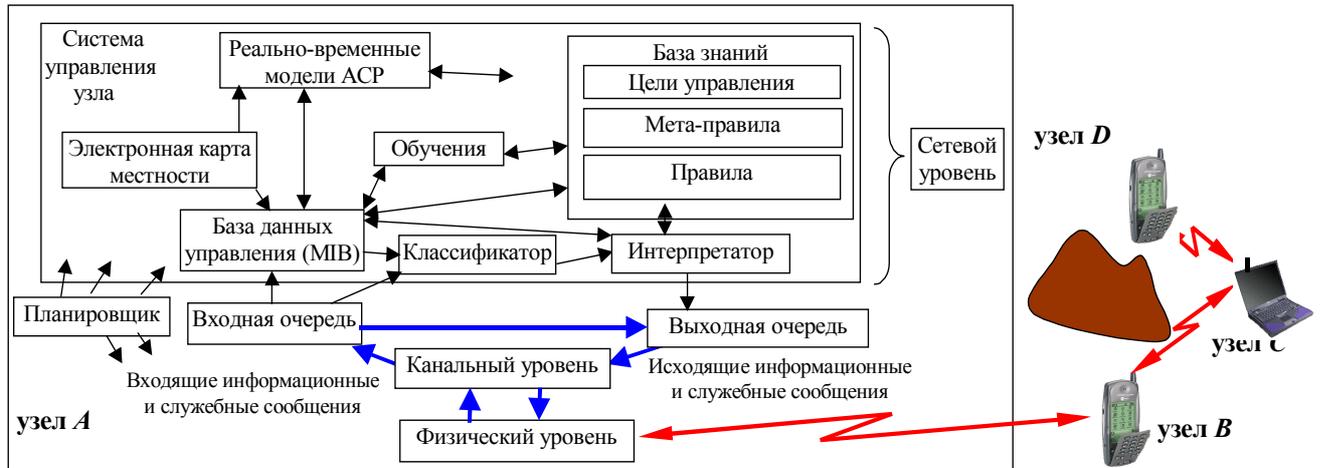


Рис. 6. Архитектура узла сети (пример развития сетевого уровня)

**12. Оценка эффективности методов управления сетью** заключается в следующем. Предлагается разделить оценку эффективности используемых методов управления на два этапа:

а). Оценка и сравнение на основе алгоритмического подхода с позиций теории сложности алгоритмов (определение временной, связной и вычислительной сложности алгоритмов, реализующих предлагаемые методы). Пример данного подхода применительно к проблеме маршрутизации в МР предложен в [23].

б). Оценка влияния системы управления на показатели эффективности всей сети. В общем случае должны быть построены зависимости сетевых показателей эффективности (пропускной способности, среднего времени передачи сообщений, соотношения объема служебной к полезной информации, средней мощности передачи и др.) от динамики изменения топологии и уровня входной нагрузки (рис. 7). Степень отличия кривых 2 и 3 от кривой 1 (идеальная система наблюдения) показывает эффективность выбранного метода управления. Таким образом, комплексной оценкой эффективности функционирования методов управления  $U_1$  и  $U_2$  является разница в пропускной способности  $\Delta S$  при изменениях уровня входной нагрузки  $\gamma$  и интенсивности топологии сети  $\nu$

$$\Delta S = S_n(\gamma, \nu) - S_{pi}(\gamma, \nu, U_i) \text{ или } \Delta S = S_{p1}(\gamma, \nu, U_1) - S_{p2}(\gamma, \nu, U_2), \quad (4)$$

где  $S_n$  и  $S_p$  – потенциальная и реализованная пропускная способность.

Для получения данных зависимостей необходима разработка соответствующих математических моделей. Получить аналитические выражения (4) не представляется возможным вследствие не стационарности происходящих процессов и значительной размерности задачи. Существующие аналитические модели позволяют определить лишь предельные значения пропускной способности узла сети [33]. Поэтому необходима разработка соответствующих имитационных моделей МР с реализацией в узлах предлагаемых методов управления, планирование и проведение экспериментов, анализ полученных результатов. При этом задачей является оценка адекватности полученной модели радиосети, т.к. полученные результаты

зависят от принятой модели мобильности узлов (случайная, случайная с остановками, групповая и др.) [36].

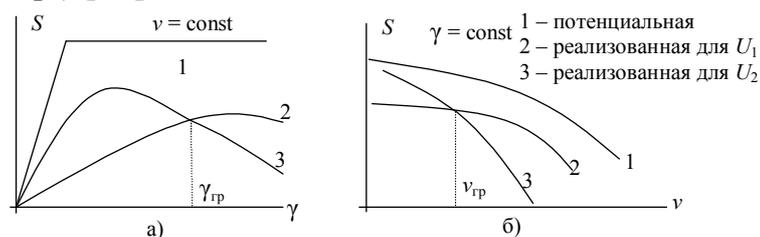


Рис. 7. Зависимости пропускной способности сети  $S$  при различных методах управления

Также необходимо отметить значительную трудоемкость, сложность построения имитационных моделей и проведение экспериментов. Универсальные системы имитационного моделирования (типа GPSS [37], СИМПАС [38]) характеризуются простотой построения моделей, но в тоже время не имеют библиотек протоколов информационного обмена и поэтому требуют значительного времени на построение и отладку моделей МР, реализующих те или иные методы управления. Поэтому целесообразен переход на современную систему имитационного моделирования типа NS/2 [39], которая имеет открытый код и встроенные протоколы информационного обмена различных уровней.

Таким образом, в статье рассмотрена методология решения проблем управления мобильными радиосетями. Для этого произведена декомпозиция проблем (по функциям и уровням) на задачи, определены требования к методам управления в МР и предложены решения задач анализа и синтеза управления данными сетями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Романюк В.А. Мобильные радиосети – перспективы беспроводных технологий // Сети и телекоммуникации. – 2003. – № 12. – С. 62 – 68.
2. Романюк В.А. Направления развития тактических сетей связи // Зв'язок. – 2001. – № 3. – С. 63 – 65.
3. Шиллер Й. Мобильные коммуникации.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2002. – 384 с.
4. Мизин И.А., Богатырев В.А., Кулешов А.П. Сети коммутации пакетов. – М.: Радио и связь, 1986. – 408 с.
5. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. – М.: Мир, 1989. – 544 с.
6. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Построение сетей интегрального обслуживания. – Л.: Машиностроение, 1990. – 332 с.
7. Арипов М.Н., Присяжнюк С.П., Шарипов Р.А. Контроль и управление в сетях передачи данных с коммутацией пакетов. – Ташкент: Фан, 1988. – 160 с.
8. Шаров А.Н. Автоматизированные сети радиосвязи. – Л.: ВАС, 1988. – 178 с.
9. Дымарский Я.С., Крутякова Н.П., Яновский Г.Г. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи. – М.: НТЦ “Мобильные коммуникации”, 2003. – 384 с.
10. Гребешков А.Ю. Стандарты и технологии управления сетями связи. – М.: Эко-Трендз, 2003. – 288 с.
11. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. – СПб: Питер, 2000. – 672 с.
12. Романюк В.А. Принципи побудови системи управління автоматизованою мережею радіозв'язку // Збірник наукових праць № 5. – К.: КВІУЗ. – 2000. – С. 60 – 64.
13. Бушуев С.Н., Осадчий А.С., Фролов В.М. Теоретические основы создания информационно-технических систем. – СПб: ВАС, 1998. – 404 с.
14. Ротштейн О.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. – Винница: “УНИВЕРСУМ-Вінниця”, 1999. – 320 с.

15. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
16. Серегин А.Г., Лычагин С.В., Шибанов В.С. Средства автоматизированного управления в системах связи. – М.: Радио и связь, 1990. – 232 с.
17. Романюк В.А. Класифікація і загальна характеристика задач управління тактичними автоматизованими мережами радіозв'язку // Праці КВІУЗ № 4. – К.: КВІУЗ. – 1999. – С. 3 – 7.
18. Романюк В.А. Активная маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2002. – № 3. – С. 21 – 25.
19. Романюк В.А. R-зоновый метод маршрутизації в автоматизованих мережах радіозв'язку // Збірник наукових праць № 3. – К.: КВІУЗ. – 2001. – С. 182 – 186.
20. Романюк В.А. Волновая маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2003. – № 4.
21. Миночкин А.И., Романюк В.А. Методы множественного доступа в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2004. – № 2.
22. Романюк В. А. Постановка проблеми маршрутизації інформаційних потоків у мережах радіозв'язку з динамічною топологією // Збірник наукових праць № 1. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2003. – С. 112 – 119.
23. Миночкин А.И., Романюк В.А. Протоколы маршрутизации в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2001. – № 1. – С. 31 – 36.
24. Миночкин А.И., Романюк В.А. Управление топологией в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2003. – № 2. – С. 28 – 33.
25. Zhu J., Qiao C., Wang W. Comprehensive Minimum Energy Routing Scheme for Wireless Ad hoc Networks // In Proceedings of IEEE INFOCOM'04, 2004.
26. Fu Z., Zerpos P., Gerla M. The Impact of Multihop Wireless Channel on TCP Throughput and Loss // In Proceedings of IEEE INFOCOM'03, 2003.
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 // In Proceedings of ICCCN'03, 2003.
28. Романюк В.А. Маршрутизация интегрального трафика в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2002. – № 2. – С. 24 – 27.
29. Mohapatra P., Li J., Gui C. QoS in Mobile Ad Hoc Networks // IEEE Wireless Communication, June 2003.
30. Kong J., Luo H., Xu K., Gu D.-L., Gerla M. Adaptive Security for Multi-layer Ad-hoc Networks // Wireless Communications and Mobile Computing (WCMC), 2002.
31. Zhou L., Haas Z.J. Securing Ad Hoc Networks // IEEE Networks Magazine, vol. 13, no. 6, 1999. – pp. 24 – 30.
32. Gupta P., Kumar P.R. The capacity of wireless networks // IEEE Transactions on Information Theory, no.46 (2), 2000, – pp. 388 – 404.
33. Романюк В.А. Иерархическая маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2002. – № 1. – С. 38 – 42.
34. Романюк В.А. Асимметричная маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2003. – № 3. – С. 28 – 30.
35. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.
36. Camp T., Boleng J., Davies V. Mobility models for ad hoc networks simulation // Wireless Communication and Mobile Computing (WCMC), 2002.
37. Кудрявцев Е.М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем. – М.: ДКМ Пресс, 2004. – 320 с.
38. Любарський С.В., Міночкін А.І., Романюк В.А., Шацко П.В. Системи імітаційного моделювання. Навчальний посібник. – К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”, 2003. – 140 с.
39. NS-2 (The Networks Simulator). <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.