

УДК 621.395.019.3

Классификация методов маршрутизации в мультисервисных сетях связи

С. Н. Новиков¹

Проведен анализ современного состояния маршрутизации в мультисервисных сетях связи. Разработана новая классификация методов маршрутизации в сетях связи. Данная классификация позволяет выявить множество вариантов реализации как последовательных, так и параллельных (многопутевых) методов маршрутизации.

Ключевые слова: маршрутизация, мультисервисная сеть.

1. Введение

С развитием телекоммуникационных технологий выбор протоколов маршрутизации не потерял своей актуальности. Вопросам классификации и исследованию методов маршрутизации посвящено множество статей, монографий и диссертаций. Фундаментальной работой в этой области следует признать монографию Medhi D. и Ramasamy K. [1]. Достаточно полная классификация методов маршрутизации в мобильных сетях связи приведена Lang D. в диссертации «On the Evaluation and Classification of Routing Protocol for Mobil Ad Hoc Networks» [2] и в статьях Гоголевой М.А. [3], Миночкина А.И., Романюк В.А. [4].

Как правило, предлагаемые классификации основываются на нескольких ключевых характеристиках и сводятся к следующим типам маршрутизации:

- 1) статическая или динамическая;
- 2) централизованная или распределённая;
- 3) от источника или пошаговая;
- 4) однопутевая или многопутевая;
- 5) однопараметрическая или многопараметрическая;
- 6) одноуровневая или иерархическая;
- 7) внутрисетевая и междоменная;
- 8) состояния канала или вектора расстояний

и другие.

Следует отметить, что данные классификации лишь констатируют существующие подходы и не показывают перспективные методы маршрутизации.

Автором предпринята попытка систематизировать и обобщить известные решения в области маршрутизации, нашедших свою реализацию в технологиях IP (Internet Protocol), ATM (Asynchrony Transfer Mode) и MPLS (Multiprotocol Label Switching).

¹ Грант фонда фундаментальных и прикладных научных исследований ФГОБУ ВПО «СибГУТИ» (Приказ № 2/168-12 от 21.02.2012 г.)

2. Обобщённая, функциональная модель маршрутизации в мультисервисных сетях связи

Дадим основные определения, необходимые для дальнейшего изложения материала. Маршрут – список элементов сети связи (узлов коммутации (УК), трактов передачи сообщений (ТПС), каналов связи (КС)), начинающийся с узла-источника (УИ) и заканчивающийся в узле-получателе (УП). Маршрутизация — набор процедур, позволяющих определить и установить оптимальное по заданным параметрам соединение на сети связи между УИ и УП.

В модели взаимосвязи открытых систем (МВОС) функции маршрутизации возложены на третий – сетевой уровень. Данный уровень удобно представить в виде двух подуровней [5]. Протоколы, участвующие во 2-ом подуровне, принято называть протоколами маршрутизации. Протоколы первого подуровня обычно называют протоколами сигнализации.

На втором подуровне производится мониторинг вероятностно-временных характеристик (ВВХ) элементов сети связи. Данная информация является основанием для определения маршрутов с требуемыми ВВХ между всеми УК сети связи. Рассчитанные маршруты прописываются в таблицах маршрутизации (ТМ) в ранжированном порядке по предпочтительности выбора. В процессе функционирования сети связи ТМ используются процедурами первого подуровня для установления соединений между пользователями.

На практике сетевой уровень реализуется в двух вариантах: с использованием только протоколов маршрутизации; с использованием протоколов маршрутизации и сигнализации. В первом случае используются технологии, не поддерживающие QoS приложений. Во втором случае – технологии с предварительным установлением соединений, гарантирующие QoS, что является необходимым условием для мультисервисных сетей связи (МСС). Поэтому в дальнейшем мы будем анализировать только второй вариант.

Вызывающий пользователь инициирует пакет вызова на установление соединения, который содержит: адрес УИ; адрес УП; одно из R приложений, которое будет участвовать в передаче пользовательской информации. Система сигнализации: принимает данный пакет; обращается к ТМ ξ -го ($\xi = \overline{1, R}$) приложения; выбирает первый в ранжированном списке маршрутов; устанавливает соединение между УИ и УП (при наличии свободных КС с требуемыми QoS). Информация установленного соединения фиксируется в таблицах коммутации (ТК), соответствующих УК. Это означает, что МСС выделила требуемые ресурсы (КС, ТПС) для данного вызова и готова для передачи пользовательской информации с требуемым QoS.

Если первый в ранжированном списке маршрут не доступен, то выбирается следующий по предпочтительности маршрут. И так до тех пор, пока маршрут не будет реализован в виде соединения между парой пользователей. В противном случае пользователю будет дан отказ в обслуживании. По завершении передачи сообщения информация в ТК стирается.

Для того чтобы была возможность определять маршруты между любой парой УК, необходимо построить ТМ в каждом УК МСС. Совокупность ТМ называют планом распределения информации (ПРИ). Если в процессе эксплуатации МСС происходит коррекция ПРИ, то такой метод формирования ПРИ называют динамическим. В противном случае статическим.

На практике ТМ реализуются в двух вариантах: пошаговые ТМ и ТМ от источника. Пошаговая таблица маршрутизации представляет собой матрицу

$$M^{(j)} = \left\| m_{i,v}^{(j)} \right\|_{(S-1), H_j} = \left(\overline{m_1^{(j)}}, \dots, \overline{m_i^{(j)}}, \dots, \overline{m_{j-1}^{(j)}}, \overline{m_{j+1}^{(j)}}, \dots, \overline{m_S^{(j)}} \right); \quad (1)$$

$$\overline{m_i^{(j)}} = \left(m_{i1}^{(j)}, \dots, m_{iV}^{(j)}, \dots, m_{iH_j}^{(j)} \right), v = \overline{1, H_j}; i, j = \overline{1, S}; i \neq j, \quad (2)$$

где S — количество УК в сети; H_j – количество исходящих ТПС из j -го УК.

Матрица $M^{(j)}$ содержит информацию о предпочтительности выбора исходящего ТПС из j -го УК при поиске маршрута к i -му узлу (УП). Первый элемент $m_{i1}^{(j)}$ (2) указывает номер исходящего ТПС из j -го УК к смежному УК, который предпочтительнее выбрать для организации маршрута к i -му УК (УП). Второй элемент $m_{i2}^{(j)}$ (2) указывает номер следующего исходящего ТПС из j -го УК к другому смежному УК, который менее предпочтителен для организации искомого маршрута к i -му УК. И так до H_j -го элемента вектор строки (2). При этом говорят, что $m_{i1}^{(j)}$ является исходящим ТПС первого выбора, $m_{i2}^{(j)}$ – исходящим ТПС второго выбора и, соответственно, $m_{iH_j}^{(j)}$ исходящим ТПС H_j -го выбора.

Таблица маршрутизации от источника представляет собой матрицу

$$M^{(j)} = \left(\overline{\mu_1^{(j)}}, \dots, \overline{\mu_i^{(j)}}, \dots, \overline{\mu_{j-1}^{(j)}}, \overline{\mu_{j+1}^{(j)}}, \dots, \overline{\mu_S^{(j)}} \right); \quad (3)$$

$$\overline{\mu_i^{(j)}} = \left(\langle \mu_{i1}^{(j)} \rangle, \dots, \langle \mu_{iv}^{(j)} \rangle, \dots, \langle \mu_{iK_i}^{(j)} \rangle \right); v = \overline{1, K_i}; i, j = \overline{1, S}; i \neq j, \quad (4)$$

где $\overline{\mu_i^{(j)}}$ – ранжированный по предпочтительности список маршрутов из j -го УИ к i -му УП; $\langle \mu_{iv}^{(j)} \rangle$ – маршрут v -го по предпочтительности выбора из j -го УИ к i -му УП; K_i – количество маршрутов в ранжированном списке из j -го УИ к i -му УП.

Таким образом, обобщённую функциональную модель маршрутизации в МСС можно представить следующим образом (рис. 1).

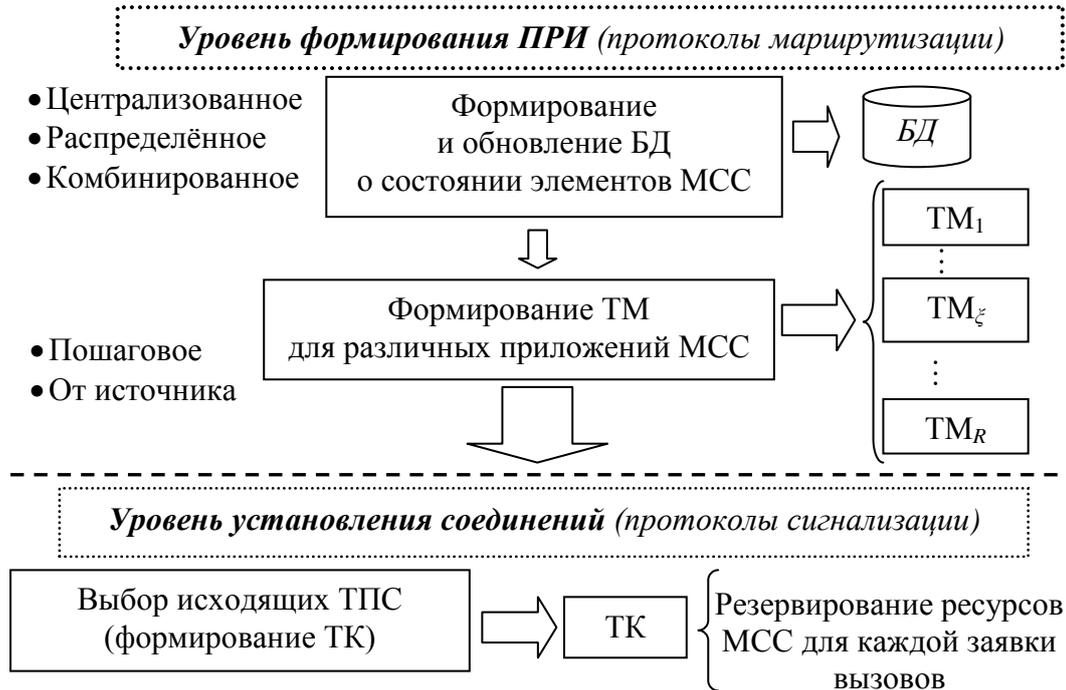


Рис. 1. Обобщённая функциональная модель маршрутизации в МСС

Основным продуктом уровня формирования ПРИ являются ТМ для каждого приложения МСС. По степени централизации методы формирования ПРИ классифицируются на централизованные, распределённые и комбинированные.

Уровень протоколов сигнализации, используя методы выбора исходящих ТПС, по ТМ формирует во всех транзитных УК, начиная с УИ, таблицы коммутации для каждой заявки на установление соединения с требуемым QoS.

Передача сообщений пользователей осуществляется по ТК, которые сформированы на уровне протоколов сигнализации.

Из приведённой обобщённой функциональной модели следует, что комбинируя независимые методы формирования ПРИ и выбора исходящих ТПС, можно реализовать множество вариантов маршрутизации в МСС.

3. Обзор современных методов маршрутизации в мультисервисных сетях связи

3.1. Современные методы формирования ПРИ в МСС

«Лавинный» метод формирования ПРИ (в отечественной литературе известен как «Волновой», «Рельефов» [6]) на сети состоит в следующем. В каждом УК через определённое время $\Delta t = \text{const}$ формируются зонд-сигналы, которые пересылаются ко всем инцидентным узлам. В соседних УК эта процедура повторяется. Таким образом, зонд-сигналы попадают во все узлы МСС. По мере продвижения по сети зонд-сигналы анализируют ВВХ всех элементов МСС. Собранная информация записывается в базы данных (БД) УК и используется для расчёта ТМ. Основным недостатком «лавинного» метода является необходимость выделения определённого ресурса сети для передачи зонд-сигналов.

Лавинный метод реализован в технологии ATM [7] и IP всех версий: RIP (Routing Information Protocol) [8], IGRP (Interior Gateway Routing Protocol), EIGRP (Extended IGRP), IS-IS (Intermediate System – to – Intermediate System) [9], OSPF (Open Shortest Path First) [10].

«Статистический» метод (первоначально известен как «Игровой» [11]) предусматривает формирование ПРИ по накопленной статистике установления соединения между заданной парой УК. Перед началом функционирования на сети устанавливается начальный ПРИ в виде набора ТМ (1) (для пошаговой ТМ). Каждому значению $m_{iv}^{(j)}; \nu = \overline{1, H_j}; i, j = \overline{1, S}; i \neq j$ матрицы (1) присваивается весовой коэффициент

$$0 \leq p_{iv}^{(j)} \leq 1; \nu = \overline{1, H_j}; i, j = \overline{1, S}; i \neq j,$$

причём

$$\overline{p_i^{(j)}} = \left(p_{i1}^{(j)}, \dots, p_{iv}^{(j)}, \dots, p_{H_j}^{(j)} \right); \nu = \overline{1, H_j}; i, j = \overline{1, S}; i \neq j; \sum_{\nu=1}^{H_j} p_{iv}^{(j)} = 1.$$

В результате формируется матрица весовых коэффициентов

$$p^{(j)} = \left\| p_{i,\nu}^{(j)} \right\|_{(S-1), H_j} = \left(\overline{p_1^{(j)}}, \dots, \overline{p_i^{(j)}}, \dots, \overline{p_{j-1}^{(j)}}, \overline{p_{j+1}^{(j)}}, \dots, \overline{p_S^{(j)}} \right), \quad (5)$$

где

$$\overline{p_i^{(j)}} = \left(p_{i1}^{(j)}, \dots, p_{iv}^{(j)}, \dots, p_{H_j}^{(j)} \right); \nu = \overline{1, H_j}; i, j = \overline{1, S}; i \neq j. \quad (6)$$

Формирование (коррекция) ПРИ и определение маршрута осуществляется следующим образом. Во всех транзитных УК, начиная с УИ, при поиске маршрута к i -му УП происходит обращение к i -м строкам матриц маршрутизации (5). В i -х строках (6) определяется максимальный весовой коэффициент $p_{iv}^{(j)}$. Тем самым выбирается ν -й исходящий ТПС из j -го УК при организации маршрута к i -му УК. В результате данных действий маршрут между заданной парой УК будет либо определён, либо данной заявке будет дан отказ в обслуживании.

В первом случае, когда маршрут между заданной парой УК определён, все ТПС, входящие в данный маршрут, поощряются. Весовые коэффициенты $p_{iv}^{(j)}$ данных исходящих ТПС $m_{iv}^{(j)}$ увеличиваются. Во втором случае, когда маршрут не определён, исходящие ТПС, участвующие в данном поиске, штрафуются. Весовые коэффициенты $p_{iv}^{(j)}$ данных исходящих ТПС $m_{iv}^{(j)}$ уменьшаются. В обоих случаях строки

$$\overline{p_i^{(j)}} = \left(p_{i1}^{(j)}, \dots, p_{iv}^{(j)}, \dots, p_{Hj}^{(j)} \right); v = \overline{1, H}; i, j = \overline{1, S}; i \neq j,$$

элементы которых были изменены (поощрены или оштрафованы), нормируются. Таким образом, в процессе эксплуатации МСС формируется оптимальный ПРИ. Критерием оптимальности является результат установления соединений в предыдущие моменты времени.

Если рассматривать весовые коэффициенты $p_{iv}^{(j)}$ как вероятности выбора соответствующих исходящих ТПС $m_{iv}^{(j)}$, то можно предположить, что «статистический» метод формирования ПРИ имеет итеративный характер и решает задачу глобальной оптимизации ПРИ на сети связи по критерию – вероятность установления соединения между парами УИ и УП.

Отсутствие необходимости передачи служебной информации при формировании ПРИ на сети является несомненным достоинством «статистического» метода. Однако данный метод обладает инерционностью. Действительно, при выходе элементов МСС из строя требуется некоторый период времени для переформирования ПРИ. Другим недостатком «игрового» метода является неопределённость выбора начального ПРИ в случае ввода новых УК в эксплуатацию. Отметим, что данный метод реализован в технологии MPLS [12].

«**Логический**» метод формирования ПРИ на сети связи состоит в процедуре, выполняемой в каждом транзитном УК, начиная с УИ, позволяющей определить исходящий ТПС, максимально близкий к геометрическому направлению поиска на УП. Для этого сеть связи вкладывается в систему координат (например, в прямоугольную). Каждому узлу сети, в соответствие с системой координат (X, Y) присваивается собственный адрес. В каждом транзитном УК (X_i, Y_j) , начиная с УИ (X_R, Y_R) , рассчитываются углы (рис. 2):

- логического направления поиска на УП $\alpha_{\text{поиска}} = \text{arctg} \frac{(Y_L - Y_R)}{(X_L - X_R)}$;
- исходящих ТПС $\alpha_1 = \text{arctg} \frac{(Y_L - Y_{i1})}{(X_L - X_i)}$; $\alpha_2 = \text{arctg} \frac{(Y_L - Y_{i2})}{(X_L - X_i)}$.

Затем определяется тот исходящий ТПС, который имеет наибольшее совпадение α_1 (на примере рис. 2) с ранее рассчитанным $\alpha_{\text{поиска}}$, геометрическим направлением поиска на УП. Если ближайший, по направлению ТПС, недоступен, то подбирается очередной α_2 по предпочтительности исходящий ТПС.

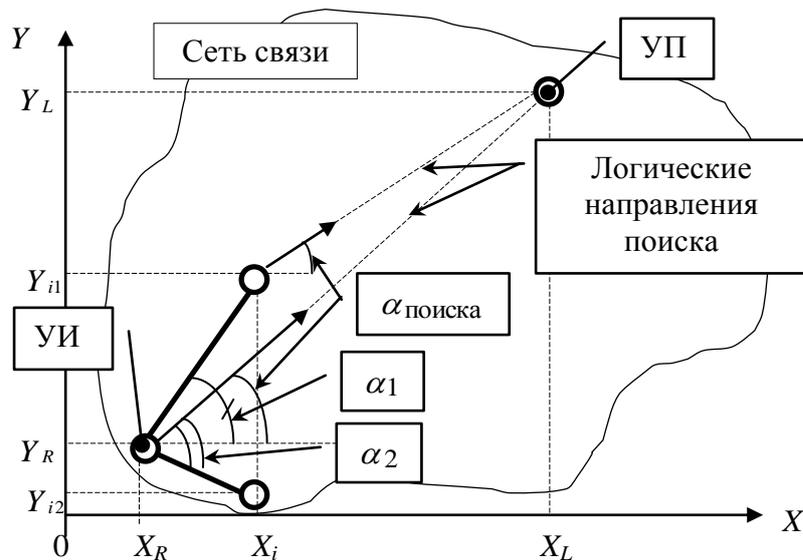


Рис. 2. Поиск маршрута логическим методом

Учитывая, что в МСС узлы стационарны, то углы всех исходящих ТПС можно рассчитать заранее и хранить в БД.

Несомненным достоинством данного метода является простота и отсутствие необходимости передачи служебной информации по сети. В то же время, данный метод не является динамическим и не решает задачу глобальной оптимизации ПРИ.

3.2. Современные методы выбора исходящих трактов в узлах коммутации МСС

В зависимости от характера распространения на сети процесса установления соединения между УИ и УП выделим три основных класса выбора исходящих ТПС: *градиентный*, *диффузный* и *градиентно-диффузный*.

Градиентный состоит в том, что в каждом транзитном узле, начиная с УИ, в процессе выбора исходящего ТПС участвуют не все исходящие ТПС, а лишь часть (наиболее предпочтительные). Если в одном из УК исходящие ТПС, участвующие в выборе, не доступны, то данной заявке на формирование маршрута даётся отказ.

В результате градиентного выбора соединение будет формироваться вдоль геометрического направления с УИ на УП (рис. 3). Увеличение количества исходящих ТПС, участвующих в выборе, приведёт к возможному отклонению маршрута от геометрического направления с УИ на УП, в том числе и в сторону, противоположную от УП. Выбор ТПС, при котором соединение формируется и в противоположную сторону от УП, будем называть диффузным. Таким образом, диффузный выбор исходящих ТПС допускает возможность выбора любого доступного исходящего ТПС. Градиентно-диффузный метод является комбинацией первых двух.

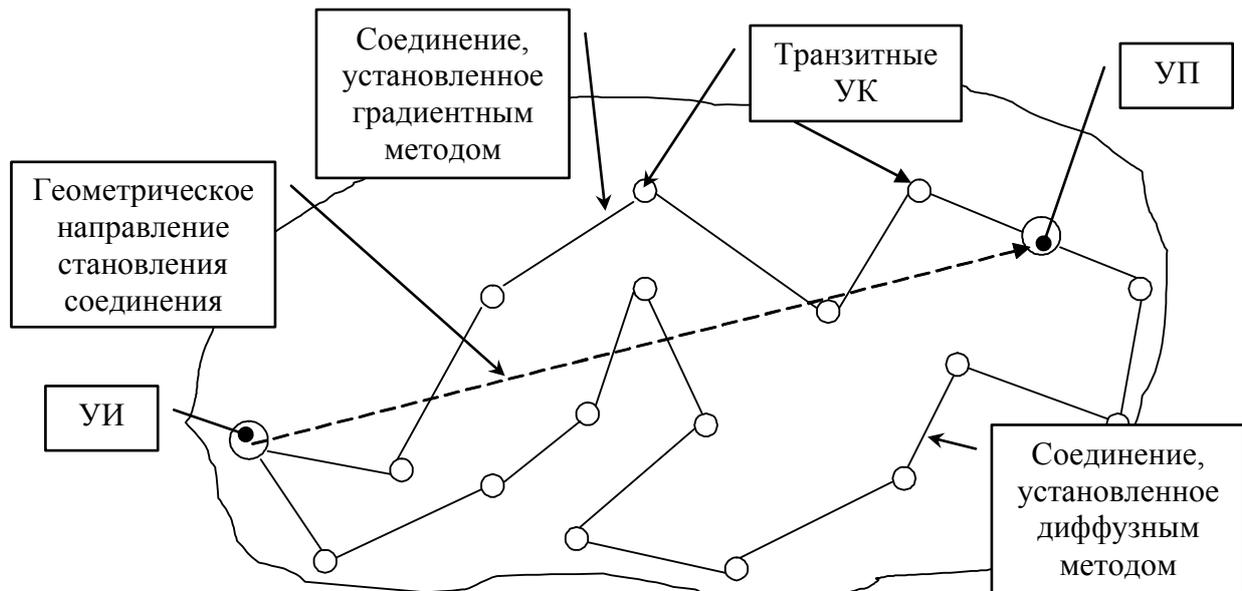


Рис. 3. Градиентный и диффузный выбор исходящих ТПС

Реализация градиентных алгоритмов выбора исходящих ТПС позволяет организовать кратчайшие соединения (по числу транзитных УК). Диффузные обладают большой гибкостью при обходах повреждённых участков сети, однако средняя длина маршрута в равных с градиентным условиях будет большей.

В свою очередь, процедура выбора исходящего ТПС в каждом УК может быть *детерминированной* и *стохастической*. В первом случае выбор исходящего ТПС осуществляется однозначно по максимальному значению одного из элементов векторов (2) или (4). Во втором случае выбор исходящего ТПС производится в результате случайного розыгрыша. Возможен и комбинированный способ выбора исходящих ТПС, который содержит как вероятностную, так детерминированную компоненты.

Независимо от перечисленных градаций выбор исходящих ТПС в УК может быть *последовательный*, *параллельный* и *последовательно-параллельный*.

Последовательный выбор исходящих ТПС состоит в том, что в каждом УК, начиная с УИ, осуществляется выбор только одного исходящего ТПС. В результате на сети формироваться одно соединение между УИ и УП. Учитывая перечисленные градации можно указать множество вариантов последовательных алгоритмов выбора исходящих ТПС в УК (например, «Диффузный, вероятностный» или «Градиентно-диффузный, детерминированный»). На сегодняшний день из последовательных методов широкое применение нашел «Диффузный, детерминированный» [7, 13, 14, 15].

При параллельном выборе исходящих ТПС (англ. Multipath Routing) [16, 17, 18] между УИ и УП одновременно устанавливается несколько соединений. Такой подход обеспечивает сбалансированную загрузку на МСС и способствует повышению, прежде всего, скоростных и связанных с ним вероятностно-временных характеристик QoS-приложений.

3.3. Классификация методов маршрутизации в сетях связи

Анализ вышеизложенного материала позволяет дать новую классификацию методам маршрутизации на сетях связи (рис. 4). Отличительная особенность данной классификации состоит в том, что она учитывает независимые процедуры: формирование плана распределения информации на сети; выбор исходящих трактов, каналов связи в УК и позволяет:

- провести целенаправленный анализ и синтез тех методов маршрутизации, которые будут наиболее эффективно функционировать в предполагаемых сетях связи и в заданных условиях;

– выявить множество вариантов реализации как последовательных, так и параллельных (многопутевых) методов маршрутизации.

В результате, комбинируя известные методы формирования ПРИ и выбора исходящих ТПС, можно получить новые методы маршрутизации, имеющие перспективу применения в МСС. Приведём примеры.

«Логико-статистический» метод является комбинацией «логического» и «статистического» методов формирования ПРИ. В условиях функционирования МСС в «нормальных» условиях (отсутствуют внешние деструктурирующие воздействия на элементы сети) формирование ПРИ осуществляется «статистическим» методом. В условиях резкого изменения структуры МСС (по каким либо причинам) применяется «логический» метод.

«Логико-лавинный» метод является комбинацией «лавинного» и «логического» методов и состоит в том, что для установления оптимального соединения между парой узлов из УИ организуется «лавинный» поиск, но не во всех направлениях, а лишь в сторону УП. Волна поиска при этом распространяется в пределах некоторой зоны в виде полосы, охватывающей УИ и УП (рис. 5). Ширина, форма полосы зависит от приоритета пользователя, состояния элементов сети, требований приложений к QoS и может устанавливаться в различных пределах. В частности, для пользователей низшей категории количество выбранных ТПС может не превышать одного, тогда поиск превращается в «чисто» последовательный.

«Логико-лавинно-статистический» метод является обобщением «логического», «лавинного» и «статистического». Применение одного из перечисленных методов зависит от условий функционирования МСС. В условиях отсутствия внешних деструктурирующих воздействий на элементы сети формирование ПРИ осуществляется «статистическим» методом. В условиях резкого изменения структуры МСС (по каким-либо причинам) применяется «логико-лавинный» метод.

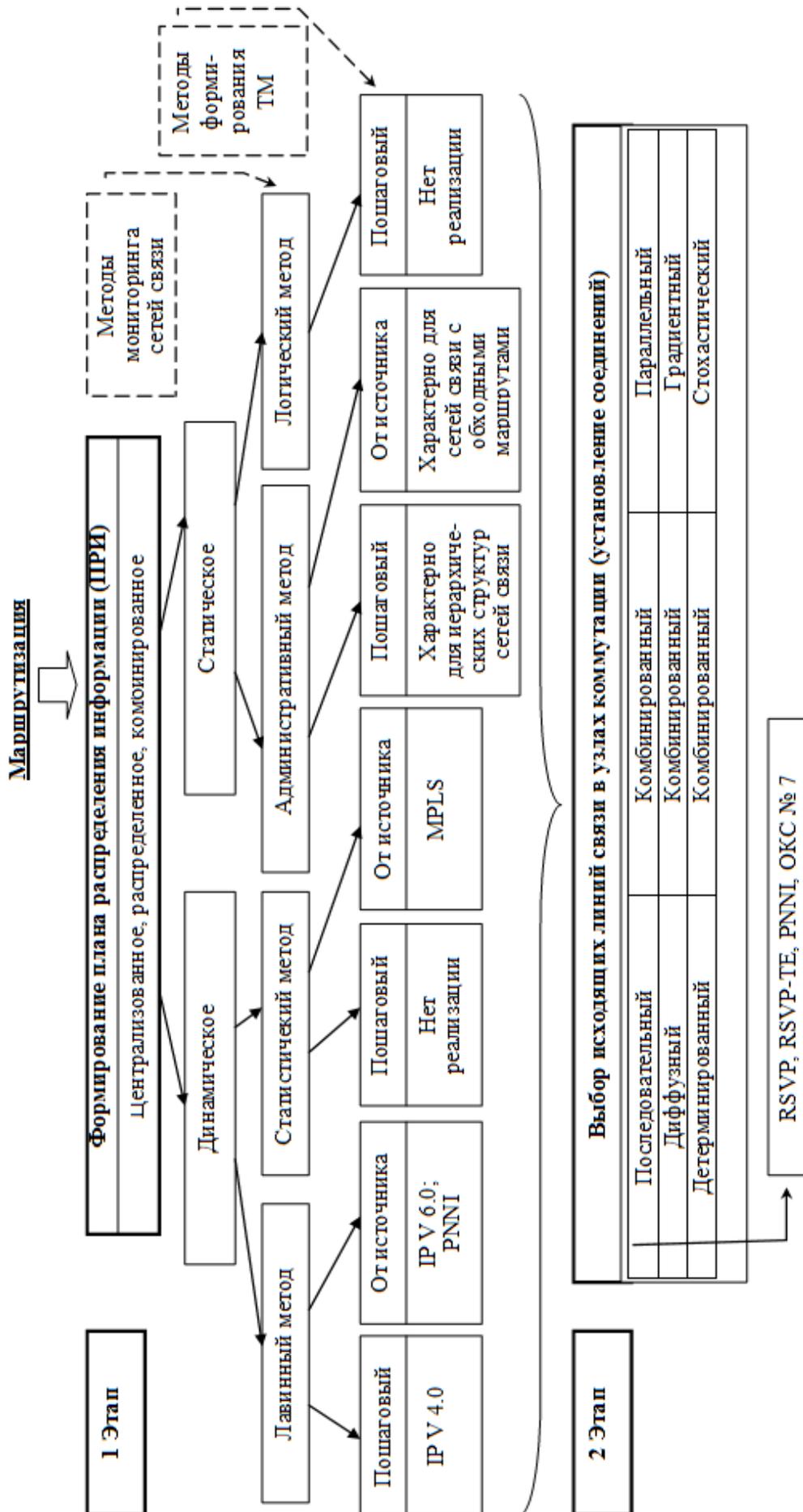


Рис. 4 Классификация методов маршрутизации в сетях связи

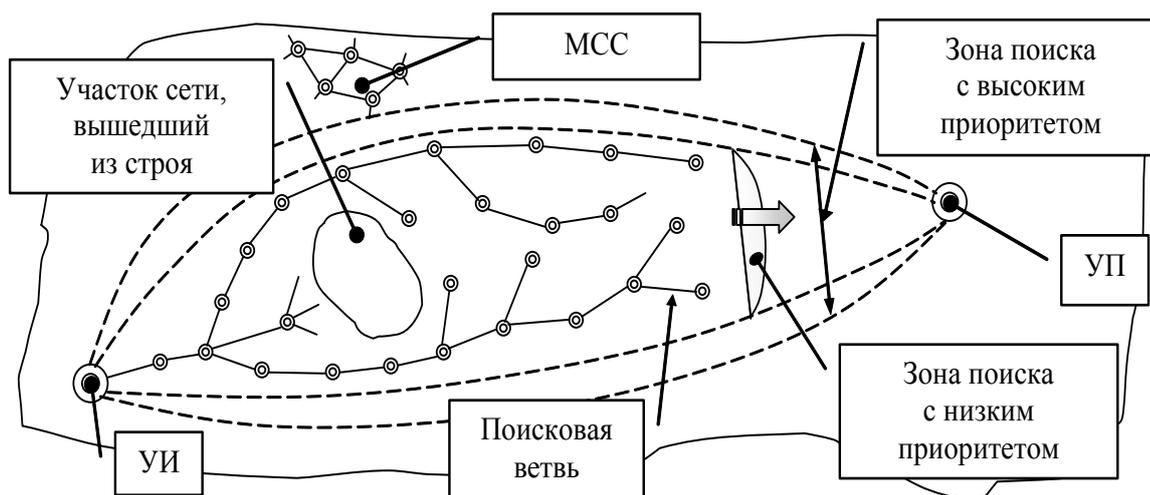


Рис. 5. Логико-лавинный метод

4. Выводы

Проведенный анализ современного состояния маршрутизации в мультисервисных сетях связи позволил разработать новую классификацию методов маршрутизации для сетей связи. Отличительная особенность данной классификации состоит в том, что она учитывает независимые процедуры: формирование плана распределения информации на сети; выбор исходящих линий, трактов, каналов связи в узлах коммутации. Данная классификация позволяет:

- выявить множество вариантов реализации как последовательных, так и параллельных (многопутевых) методов маршрутизации (англ. Multipath Routing);
- провести целенаправленный анализ и синтез тех методов маршрутизации, которые будут наиболее эффективно функционировать в предполагаемых сетях связи и в заданных условиях.

Литература

1. Network routing : algorithms, protocols, and architectures / Medhi D., Ramasamy K. San Francisco: Kaufmann Publishers is an imprint of Elsevier, 2007.-824 p.
2. Lang D. On the Evaluation and Classification of Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks // München, Techn. Univ., Diss. Dokt, 2006.-345 s.
3. Гоголева М. А. Классификация и анализ методов маршрутизации в MESH-сетях // Радиотехника. 2008. Вып. 155. - С. 173-185.
4. Миночкин А.И., Романюк В.А. Маршрутизация в мобильных радиосетях – проблема и пути решения // Зв'язок. – 2006. – № 7. – С. 49 – 55.
5. Лазарев В.Г. Интеллектуальные цифровые сети: Справочник/Под ред. Н.А. Кузнецова М.: Финансы и статистика, 1996.-224 с.
6. Лазарев В.Г., Лазарев Ю.В. Динамическое управление потоками информации в сетях связи. М.: Радио и связь, 1983.- 216 с.
7. ATM Forum Private Network-Network Interface Specification Version 1.1 (PNNI 1.1) — ATM Forum — af-pnni-0055.001, March, 2001.
8. RFC 2453 RIP Version 2, November 1998.
9. ISO/IEC 10589 Information technology — Telecommunications and information exchange between systems — Intermediate System to Intermediate System intra-domain routing

information exchange protocol for use in conjunction with the protocol for providing the connectionless-mode network service (ISO 8473), Second edition 2002-11-15.

10. RFC 2328 OSPF Version 2, April 1998.
11. *Лазарев В.Г., Паршенков Н.Я.* Игровой метод динамического управления сетью связи. В кн.: Построение управляющих устройств и систем.- М.: Наука, 1974, с. 161-172.
12. RFC 3031 Multiprotocol Label Switching Architecture, January 2001.
13. RFC 2205 Version 1 Functional Specification - Version 1 Functional Specification, September 1997.
14. RFC 33209 RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels. December 2001.
15. RFC 5420 Encoding of Attributes for MPLS LSP Establishment Using Resource Reservation Protocol Traffic Engineering (RSVP-TE) February 2009.
16. *Мартынова О.П.* Параллельный алгоритм маршрутизации на графах и сетях / О.П. Мартынова // Проблемы інформатизації та управління: зб. наук. пр. – К.: НАУ, 2005. – Вип. 12. – С. 113-119.
17. *Кулаков Ю.А., Левчук А.В.* Многопутевая маршрутизация в беспроводных сетях // Электроника и системы управления - М.: НАУ.2010 - № 4 (26) 2010. – с. 142-147.
18. *I. Gojmerac, P. Reichl, L. Jansen:* Towards Low-complexity Internet Traffic Engineering: The Adaptive Multi-Path Algorithm. Journal of Computer Networks, Special Issue on «Complex Computer and Communication Networks», vol. 52, pp. 2894 – 2907, Dec. 2008.

Статья поступила в редакцию 04.12.2012

Новиков Сергей Николаевич

к.т.н., доцент, профессор кафедры безопасности и управления в телекоммуникациях
СибГУТИ, ул. Кирова, 86) тел. (383) 2-698-245, e-mail: snovikov@mbit.ru

Classification of routing methods in multiservice networks

S. Novikov

The analysis of current condition of routing in multiservice networks is carried out. New classification of routing methods in communication networks is developed. This classification allows to identify the set of variants of both sequential and parallel (multi-path) routing methods.

Keywords: routing, multi-service network.