

Клименко И.А., канд. техн. наук,  
Ткаченко В.В., канд. техн. наук,  
Аленина Н.А.

## АДАПТИВНАЯ МНОГОКАНАЛЬНАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ В МОБИЛЬНОЙ СЕТИ MPLS

Институт компьютерных технологий  
Национального авиационного университета

*Рассматриваются вопросы повышения эффективности функционирования мобильных компьютерных сетей с технологией MPLS за счет использования многоканальной маршрутизации. В статье предложено и обосновано использование протокола маршрутизации от источника AODV для формирования таблиц IP-маршрутизации*

### Вступление

Учитывая динамическую природу мобильных компьютерных сетей и ограниченную полосу пропускания беспроводных каналов связи, основная проблема маршрутизации в таких сетях сводится к решению задачи адаптивной ремаршрутизации, которая состоит в оперативном отыскании новых маршрутов или перенаправления потока данных по имеющимся альтернативным маршрутам с учетом параметров качества обслуживания.

Развитие компьютерных сетей с высокоскоростными каналами передачи данных в направлении расширения области использования мобильных технологий в составе таких сетей, а так же повышенные требования современного трафика к качеству передачи данных определяют актуальность решения задачи ремаршрутизации.

В данном контексте эффективным подходом является использование многоканальной маршрутизации, основная идея которой – создание и поддержание нескольких альтернативных маршрутов передачи данных.

### Постановка задачи

Многоканальная маршрутизация должна обеспечивать высокую пропускную способность, малое время задержки. С такими задачами вполне справляются традиционные протоколы маршрутизации, перенаправляя поток данных по наиболее оптимальным маршрутам, с точки зрения пропускной способности каналов, времени задержки и других параметров качества обслуживания.

Однако к основным требованиям, предъявляемым к современным мобильным сетям с высокоскоростными каналами связи, относятся высокая пропускная способность, малое значение задержки и решение задачи адаптивной ремаршрутизации. Кроме того, с увеличением размеров компьютерных сетей актуальной становится задача масштабируемости сети при сохранении эффективности передачи данных. Использование многоканальной маршрутизации должно решать не только задачу перенаправления трафика, а и реализовать балансировку потоков трафика в зависимости от параметров сети и распределение потоков трафика по нескольким оптимальным маршрутам. Традиционные протоколы маршрутизации, основанные на обработке пакетов на сетевом уровне, не позволяют эффективно решать поставленные задачи в современных мобильных сетях.

Для решения рассмотренных задач настоящее время используется технология многопротокольной коммутации по меткам MPLS (*MultiProtocol Label Switching*) [11], которая обеспечивает построение магистральных сетей, имеющих практически неограниченные возможности масштабирования, высокую скорость обработки трафика и достаточную гибкость с точки зрения организации дополнительных сервисов и поддержки требуемого качества обслуживания QoS (*Quality of Service*).

**Многопротокольная коммутация по меткам**

В основе технологии *MPLS* лежит принцип передачи данных на основе замены меток с использованием информации о маршрутах [11]. Любой передаваемый пакет в момент поступления в сеть причисляется к определенному классу эквивалентности при пересылке *FEC* (*Forwarding Equivalence Class*). Класс *FEC* представляет собой семейство пакетов сетевого уровня, которые отправляются одинаковым способом по одному и тому же маршруту и обрабатываются одинаковым образом. Класс *FEC*, к которому причисляется пакет, кодируется значением фиксированной длины, называемым меткой (*label*) [2, 11]. Метка передается в составе каждого кадра, причем способ ее привязки к кадру зависит от используемой технологии канального уровня. Метки присваиваются пакетам один раз до отправки через сеть, на последующих транзитных участках не производят-

ся анализ заголовка сетевого уровня. Метки используются в качестве индекса таблицы маршрутизации, в которой указаны адрес следующей транзитной точки и новая метка. Существующая метка заменяется новой, и пакет передается следующему на пути устройству. Таким образом, передача пакетов в сети *MPLS* управляется метками и осуществляется коммутаторами, которые не анализируют заголовки сетевого уровня, а продвигают пакет, выполняя поиск и замену меток.

Технология *MPLS* реализует *управляющий компонент (control component)* – отвечающий за формирование меток и их распространение между устройствами сети, и *передающий компонент (forwarding component)* – осуществляющий коммутацию пакетов путем замены меток, основываясь на информации управляющего компонента. Структура узла сети *MPLS* в данном контексте изображена на рис. 1.

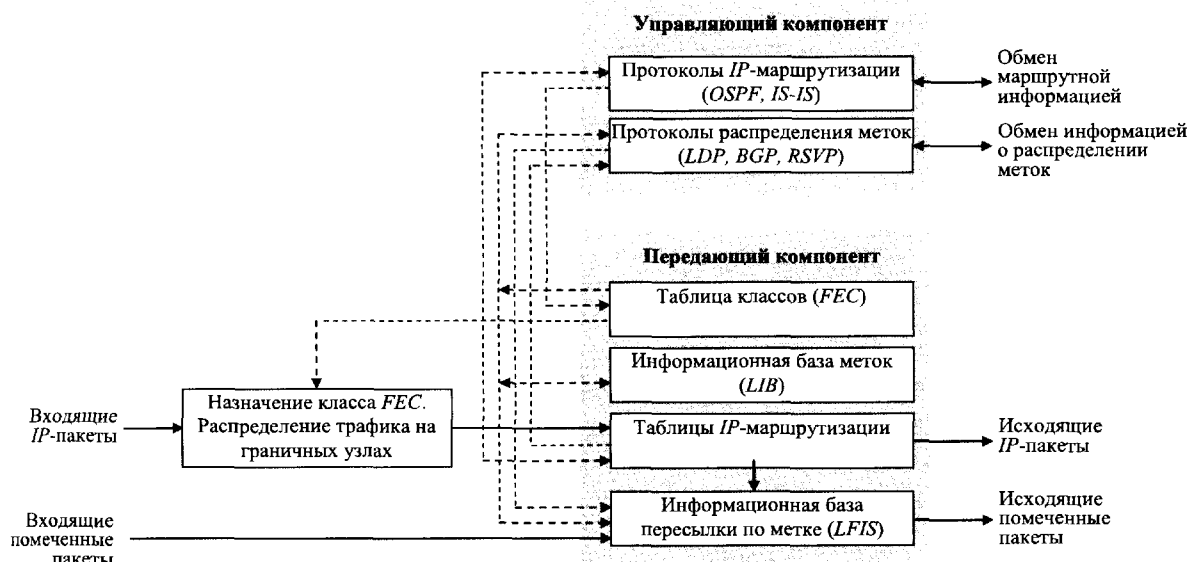


Рис. 1. Структура узла *MPLS*

Каждый узел *MPLS* поддерживает две таблицы, относящиеся к пересылке информации – информационную базу меток *LIB* (*Label Information Base*) и информационную базу пересылки по меткам *LFIB* (*Label Forwarding Information Base*). База *LIB* содержит все метки, назначенные локальным узлом и таблицы преобразований этих меток в метки, полученные от соседних узлов. База *LFIB* использует метки, содержащиеся в базе *LIB* для фор-

мирования маршрутов перенаправления пакетов.

Передающий компонент для дальнейшей передачи пакетов, помеченных метками *MPLS*, использует информацию, содержащуюся в базе *LFIB*, и информацию, содержащуюся в значении самой метки. Подробно механизм коммутации пакетов в сети описан в работе [2].

Управляющий компонент отвечает за формирование и поддержку базы *LFIB*.

Для обмена информацией маршрутизации между узлами сети *MPLS* используются протоколы *IP*-маршрутизации. Традиционно для распространения топологической информации о сети используется протокол маршрутизации *OSPF*, *IS-IS* [8].

Обмен метками производится с помощью специального протокола распределения меток *LDP (Label Distribution Protocol)* [11]. Могут так же использоваться модифицированные версии других протоколов сигнализации в сети, например, протокола маршрутизации *BGP*, расширения протокола резервирования ресурсов *RSVP* [4]). Этот подход позволяет согласовать распространение информации о привязке меток с распространением маршрутной информации, что упрощает работу системы, поскольку нет необходимости использовать отдельный протокол распространения меток.

Метки, которыми обмениваются смежные узлы, используются для формирования базы *LIB*. Распределение меток между маршрутизаторами *LSR* приводит к установлению внутри *MPLS*-облака путей с коммутацией по меткам *LSP (Label Switching Path)*, каждому из которых соответствует запись в базе. В результате каждый маршрутизатор *LSR* содержит таблицу, которая ставит в соответствие паре «входной интерфейс, входная метка» тройку «префикс адреса получателя, выходной интерфейс, выходная метка» [2].

Таким образом, главная особенность *MPLS* – отделение процесса коммутации пакета от анализа *IP*-адресов в его заголовке, что открывает ряд дополнительных возможностей. Очевидным следствием описанного подхода является тот факт, что очередной сегмент *LSP*-маршрута может не совпадать с сегментом маршрута, который был бы выбран при традиционной маршрутизации.

### **Адаптивная многоканальная маршрутизация в мобильной сети MPLS**

В работе [2] описаны преимущества использования технологии *MPLS* по сравнению с традиционной маршрутизацией. Представленные положения обуславли-

вают преимущества использования технологии *MPLS* в мобильных компьютерных сетях.

С точки зрения повышения эффективности передачи данных за счет организации многоканальной маршрутизации в мобильных компьютерных сетях использование технологии *MPLS* позволит реализовать задачи, разделение трафика и управление трафиком, многопутевая маршрутизации, поддержку необходимого *QoS* [2, 4, 7, 11].

Так отделение выбора маршрута от анализа *IP*-адреса дает ряд преимуществ, таких как реализация управления потоками трафика, вследствие чего потоки могут быть перенаправлены по недогруженным маршрутам или по маршрутам отвечающим требованиям *QoS*.

Поскольку на установление соответствия пакетов определенным *FEC*-классам могут влиять не только *IP*-адреса, но и другие параметры, такие как полоса пропускания канала связи, задержка передачи данных, устойчивость маршрута, нетрудно реализовать назначение различных *LSP*-путей пакетам, относящимся к различным потокам трафика или имеющим разные приоритеты обслуживания.

Каждый из *FEC*-классов обрабатывается отдельно от остальных, не только потому, что для него строится свой *LSP*-путь, но и в смысле доступа к общим ресурсам (полосе пропускания канала и буферному пространству). В результате технология *MPLS* позволяет достаточно эффективно поддерживать требуемый уровень *QoS*, не нарушая предоставленных пользователю гарантий, что очень актуально при передаче разнородного трафика в мобильных сетях [1].

Одним из важных параметров качества обслуживания является задержка передачи данных. В *MPLS*-сети увеличивается скорость обработки пакетов в узлах, так как не требуется извлекать пакет из кадра, определять *IP*-адрес и производить поиск в таблице маршрутизации наиболее подходящего адресного префикса.

Однако использование традиционной технологии *MPLS* в мобильных компьютерных сетях сопряжено с проблема-

ми, зв'язаними з особливостями мобільних мереж.

Одной из важных функций передающего компонента, которая влияет на время формирования маршрутов передачи данных, является поддержка таблиц IP-маршрутизации. Следует отметить, что традиционно используемые для этого протоколы *OSPF* и *IS-IS* эффективны в стационарных компьютерных сетях, могут использоваться в мобильных компьютерных сетях небольших размеров и с низкой мобильностью [1, 3]. Однако при увеличении размеров мобильной сети и скорости изменения положения узлов резко увеличивается вычислительная сложность алгоритмов маршрутизации, объемы служебной информации, время формирования маршрутов передачи данных.

В качестве решения данной проблемы предлагается использовать кластерный подход к маршрутизации [3], разбивая мобильную сеть на кластеры, тем самым разделяя задачу маршрутизации на внутрикластерную и межкластерную маршрутизацию.

В этом случае мобильная *MPLS*-сеть представляется в виде логических групп узлов, при чем одни узлы сети могут обмениваться информацией только внутри группы, другие с узлами других групп. При такой организации мобильной компьютерной сети разделение функциональности между ядром и граничной областью *MPLS*-сети эффективно, за счет упрощения структуры узлов ядра сети и повышения их быстродействия. Политика управления трафиком реализуется только на граничных узлах, что облегчает настройку сети (рис 2).

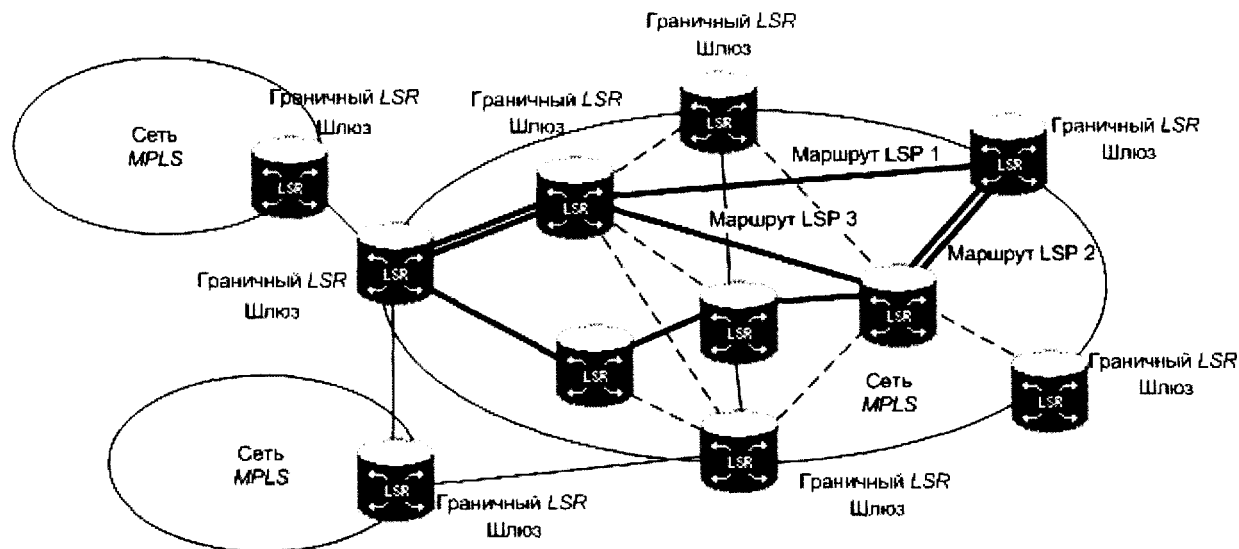


Рис. 2. Кластерная структура сети *MPLS*

Таким образом, технология *MPLS* предполагает перенос основных функций по определению пути прохождения пакета через сеть на граничные маршрутизаторы, что с одной стороны усложняет их реализацию, а с другой – при создании эффективных алгоритмов для обработки и распределения пакетов на этих узлах, позволяет реализовать многоканальную маршрутизацию внутри кластера. В работе [2] реализован алгоритм многоканальной маршрутизации средствами *MPLS*, который представляет собой способ распределения потоков пакетов на граничном

узле *MPLS*-сети, а также алгоритм управления таблицами *FEC*-классов. Данный алгоритм может быть использован в качестве алгоритма балансировки нагрузки в мобильных сетях для повышения уровня качества обслуживания. При использовании алгоритма предполагается, что существуют несколько установленных явных *LSP* путей между входным узлом и выходным узлом в *MPLS*-сети. Одной из задач управления трафиком на входящем узле является оптимальное распределение трафика по этим нескольким путям, на-

пример такое, что нагрузка на каналы передачи данных будет равномерной.

### **Протокол маршрутизации AODV**

В качестве алгоритма формирования таблиц внутрикластерной маршрутизации в данной работе предложено использовать специальный дистанционно-векторный протокол маршрутизации *AODV* (*The Ad-Hoc On Demand Distance Vector*) [10], разработанный для эпизодических мобильных компьютерных сетей класса *Ad-Hoc* [1]. Протокол *AODV* характеризуется быстрой адаптацией к динамической топологии мобильной сети, низкой вычислительной сложностью и требованиями к памяти, высокой скоростью формирования маршрутов, отсутствием циклов и связанной с ними проблемы «счета до бесконечности», характерной классическим дистанционно-векторным протоколам.

Протокол *AODV* основан на алгоритме маршрутизации по требованию, то есть маршруты между узлами строятся по мере необходимости и хранятся, пока они необходимы. Отсутствие циклов достигается с помощью использования порядковых номеров, которые сохраняет каждый узел и, которые монотонно увеличиваются каждый раз, когда узел узнает об изменении топологии сети. Порядковые номера гарантируют, что каждый раз, при передаче данных выбирается самый современный маршрут. Протокол *AODV* поддерживает однонаправленную, многоадресную, широковещательную передачу и формирует деревья, соединяющие элементы многоадресной группы.

Следует отметить, что *AODV* относится к гибридным протоколам маршрутизации, которые строят маршруты передачи данных по принципу от источника, а для формирования маршрутов используют таблицы маршрутизации, которые сохраняются и поддерживаются в каждом узле сети [1]. Для формирования таблиц маршрутизации используется дистанционно-векторный алгоритм маршрутизации. Следовательно, *AODV* не размещает никакой дополнительной информации в пакеты данных, что характерно классическим

протоколам маршрутизации от источника. Таблицы маршрутизации сохраняют одноадресные и многоадресные маршруты, даже для узлов, находящихся в постоянном движении. Кроме того, обеспечивается быстрое стирание недействительных маршрутов с помощью специального сообщения об ошибках маршрута.

Протокол *AODV* отвечает на топологические изменения сети быстрым и своевременным способом. Созданию новых маршрутов характерны лишь небольшие затраты пропускной способности за счет передачи контрольной информации.

Таблица маршрутизации хранит информацию для каждого маршрута:

- IP-адрес получателя;
- порядковый номер получателя;
- индекс – количество «перелетов» к получателю;
- следующий «перелет» – соседний узел, который был определен в качестве следующего шага для передачи пакетов по пути к получателю для этого маршрута;
- время жизни маршрута – время, на протяжении которого маршрут считается актуальным;
- активный список «соседей» – соседние узлы, которые активно используют данный маршрут;
- буфер запросов – удостоверяется, что запрос обрабатывается только один раз.

Сравнительная характеристика по основным параметрам наиболее характерных представителей каждого класса протоколов маршрутизации представлена в табл. 1 (где,  $n$  – количество узлов кластера,  $d$  – связность узлов).

В работе [3] приведен и обоснован способ динамической маршрутизации в мобильных компьютерных сетях, который основан на табличном подходе и для формирования таблиц внутрикластерной маршрутизации использует алгоритм маршрутизации по состоянию связей. Способ эффективен при некоторых ограничениях на структуру кластера. При формировании структуры кластеров используется специальный алгоритм, который контролирует связность узлов и диа-

метр кластера с точки зрения минимизации объема служебной информации [1, 3].

Таблица 1. Сравнение основных параметров протоколов маршрутизации

Название и тип протокола маршрутизации		Наличие циклов	Поддержка QoS	Затраты памяти	Сложность вычислений
<i>OSPF</i>	Табличный (по состоянию связей)	Кратковременные	Расширения	$F(n^2)$	$F(n^2)$
<i>RIP</i>	Табличный (дистанционно-векторный)	Кратковременные и долговременные	Нет	$F(nd)$	$F(n^2)$
<i>DSDV</i>	Табличный, адаптированный к мобильным сетям (по состоянию связей)	Нет	Нет	$F(n)$	Трудноопределяемая
<i>AODV</i>	Гибридный (от источника + дистанционно-векторный)	Нет	Расширения	$F(n)$	$F(2d)$
<i>DSR</i>	От источника	Нет	Нет	$F(n)$	$F(2d)$

Сравнительно с маршрутизацией по состоянию связей, дистанционно-векторная маршрутизация вычислительно более эффективна, легче применима и требует значительно меньше памяти. Однако, вектор расстояний может быть причиной формирования кратковременных и долговременных циклов.

Однако использование табличных протоколов маршрутизации в мобильных компьютерных сетях в связи с особенностями сетей такого класса эффективно лишь при небольшом количестве узлов и низкой мобильности. В современных мобильных компьютерных сетях с высокой подвижностью узлов для решения задачи адаптивной ремаршрутизации наиболее эффективно использовать протоколы маршрутизации разработанные специально для мобильных сетей [1, 5, 6, 9,10].

Дистанционно-векторная маршрутизация с нумерацией и оценкой пути к пункту назначения *DSDV* (Destination-Sequenced Distance-Vector Routing), разработанная для эпизодических мобильных сетей, имеет ряд недостатков [9]. Трудноопределяемое время установки маршрута приводит к колебаниям маршрута и ложным объявлениям, периодически вызываемые модернизации маршрута причиняют непроизводительные затраты пропускной способности, неявная синхронизация таблиц маршрутизации

вызывает проблему ожидания. Кроме того, протокол не поддерживает многопутевую маршрутизацию.

Динамическая маршрутизация от источника *DSR* (Dynamic Source Routing) [5] означает, что каждый пакет должен содержать полный путь, который он должен проделать в сети, все решения о маршрутизации принимаются отправителем. Преимущество этого подхода в полном отсутствии циклов, необходимости поддержки таблиц маршрутизации. Каждый новый сформированный маршрут является самым актуальным. Недостаток, в том, что каждый пакет требует некоторых издержек сети и при увеличении количества размеров сети и подвижности узлов резко увеличивается вычислительная сложности алгоритма, затраты памяти. Однако алгоритмы маршрутизации от источника используют для реализации межкластерной маршрутизации [6].

### Выводы

Кластерная организация сети с технологией *MPLS* позволяет в пределах каждого кластера реализовать *MPLS*-облако, с тем, чтобы граничные *LSR*-маршрутизаторы выполняли роль шлюзов кластера. Такая организация приводит к тому, что основная нагрузка по принятию решений о выборе путей для пакетов ложится на граничные маршрутизаторы.

Особенности и технологические возможности сети *MPLS* позволяют эффективно реализовать на граничных маршрутизаторах задачу разделения трафика, управление трафиком и многоканальную маршрутизацию и, кроме того, обеспечить поддержку необходимого *QoS* средствами *MPLS*.

С точки зрения повышения эффективности технологии *MPLS* в мобильных компьютерных сетях, для формирования таблиц *IP*-маршрутизации предложено использовать специальный протокол для мобильных компьютерных сетей *AODV*. С точки зрения проведенного сравнительного анализа, следует отметить, что протокол *AODV* характеризуется быстрой адаптацией к динамической топологии мобильной сети, низкой вычислительной сложностью и требованиям к памяти, высокой скоростью формирования маршрутов, отсутствием циклов и расширениями для поддержки *QoS*.

#### Список литературы

1. Жуков И.А., Клименко И.А. Обеспечение заданного уровня качества обслуживания в объединенных сетях // Проблемы інформатизації та управління: Зб. наук. пр. – К.: НАУ, 2005. – Вип. 13. – С. 5–14.
2. Жуков И.А., Клименко И.А., Аленин О.И. Организация многопутевой маршрутизации средствами *MPLS* // Проблемы інформатизації та управління: Зб. наук. пр. – К.: НАУ, 2005. – Вип. 14. – С.59–70.
3. Клименко И.А. Способ динамической маршрутизации с поддержкой требуемого уровня качества обслуживания в мобильных сетях без фиксированной инфраструктуры // Проблемы інформатизації та управління: Зб. наук. пр. – К.: НАУ, 2005. – Вип. 15. – С. 102–112.
4. Aggarwal R., Papadimitriou D., Yasukawa S. Extensions to RSVP-TE for Point to Multipoint TE LSPs. // IETF – 2004.
5. Alilou M., Dehghan M. Upgrading Performance of DSR Routing Protocol in Mobile Ad Hoc Networks // Proc/ 3<sup>rd</sup> World Enformatika Conference (WEC 2005)/ – Istanbul (Turkey), 2005. – P/38–40.
6. Chen Y.P., Liestman A.L. A zonal algorithm for clustering Ad Hoc networks // International Journal of Foundation of Computer Science. – 2003. – Vol.14, №2. – P. 305–322.
7. Elwalid A., Jin C., Low S., Widjaja I. MATE: MPLS Adaptive Traffic Engineering. // IEEE INFOCOM – 2003.
8. OSPF Version 2. Moy. J. // RFC 1247. – 1991.
9. Perkins C.E., Bhagwat P. Highly Dynamic Destination-Sequence Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers // Proc. Conf. on Communication, Architectures, Protocols and Application (SIGCOMM 94). – London (UK), 1994 – P. 234–244.
10. Perkins C.E., Royer E.M., Das S. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing // IETF RFC 3591, <http://www.rfc-editor.org/rfc3591.txt>. – 2003.
11. Rosen E. Vashvanathan F., Callon R. Multiprotocol label switching architecture // RFC-3031, <http://www.rfc-editor.org/rfc3013.txt>. – 2001.