



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕГМЕНТНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ В ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМЫХ СЕТЯХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ НАДЕЖНОСТИ И МАСШТАБИРУЕМОСТИ.

Раимкулов У.М.

Нуритдинов Ш.Ш.

Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хорезми, Ташкент, Узбекистан  
АК "Узбектелеком", инженер высшей категории

\* raimkulovural@gmail.com

<https://doi.org/10.5281/zenodo.14868769>

### ARTICLE INFO

Qabul qilindi: 04-Fevral 2025 yil

Ma'qullandi: 08-Fevral 2025 yil

Nashr qilindi: 14-Fevral 2025 yil

### KEYWORDS

сегментная маршрутизация, программно-управляемые сети, MPLS, SR, SDN, PCE, PCEP.

### ABSTRACT

В данной статье исследуются структура, ключевые компоненты и принципы работы Segment Routing (SR). Сегментная маршрутизация представляет собой метод управления трафиком в глобальных сетях (WAN), который может быть реализован в сетях MPLS и сетях, использующих только BGP. SR рассматривается как инструмент для повышения производительности и оптимизации инфраструктуры. Основные преимущества SR достигаются благодаря интеграции с концепцией программно-определяемых сетей (SDN), при этом не требуется изменять стандартную плоскость передачи данных для технологий, на которых применяется SR. В статье также обсуждаются основные сферы применения SR, а также особенности его работы в централизованных и децентрализованных сетях. Приводятся примеры контроллеров, используемых для реализации SDN с применением SR. Наличие контроллера в сети позволяет реализовывать такие функции, как выделение пропускной способности по запросу, приоритизация трафика, а также более гибкий и частый выбор оптимальных маршрутов для различных типов трафика без необходимости использования дополнительных протоколов или оборудования.

### Введение

Глобальные сети (WAN) являются важнейшим звеном для большинства людей и компаний по всему миру. Интернет стал наиболее значимым объединяющим элементом в работе практически всей инфраструктуры, во многом являясь основой современного бизнеса. Современные глобальные сети начали свое существование в

конце 60-х годов XX века. Их прототипом стала сеть ARPANET, разработанная в США для военных исследовательских целей.

Историю развития WAN-сетей можно разделить на три этапа:

- С середины 1980-х годов конвергентные сети стали набирать популярность, при этом было разработано множество приложений для передачи различных типов данных.
- В конце 1980-х и 1990-х годов в конвергентных транспортных сетях доминировали такие протоколы, как Frame-Relay (FR) и Asynchronous Transfer Mode(ATM).
- В начале 2000-х был разработан механизм многопротокольной коммутации по меткам (MPLS), который был предназначен для решения проблемы "стыков" в глобальной сети с сетями операторов связи, а также для более эффективного и быстрого управления коммуникациями с использованием меток, а не полагаясь исключительно на IP-адреса. Важно отметить, что такой подход сочетает в себе преимущество скорости уровня L2 с гибкостью уровня L3.

### Сегментная маршрутизация и SDN

Во второй половине 2010-х годов технология MPLS получила широкое распространение. Активное использование данной технологии позволило телекоммуникационным операторам и крупным корпоративным клиентам эффективно передавать большие объемы данных с высокой пропускной способностью. Данная технология позволяет установить определенный стек меток на пограничном маршрутизаторе, и все помеченные пакеты, использующие этот стек, будут передаваться по сети без дополнительного анализа заголовка IP на промежуточных узлах. Использование MPLS позволяет телеком-операторам реализовывать практически любые сервисы (набор сервисов), передавать данные любых протоколов (например, Ethernet, PPP, HDLC), строить накладные сети на основе L2 / L3 VPN, реализовывать различные взаимодействия между сетями операторов (например, Carrier Supporting Carrier) [1].

Схематическое представление MPLS / VPN-домена (сети оператора) показано на

**Рисунке 1**, где:

- **PE** – пограничный маршрутизатор провайдера;
- **CE** – клиентский маршрутизатор, который подключается непосредственно к пограничному маршрутизатору провайдера.

Маршрутизаторы сети оператора формируют MPLS-домен.

С точки зрения пограничного маршрутизатора (PE), работа с метками сводится к выполнению нескольких действий, таких как: **push** (инкапсуляция определенного набора меток), **pop** (деинкапсуляция стека меток) и **swap** (замена одной метки на другую). Для производителей телекоммуникационного оборудования реализация поддержки MPLS в большинстве их продуктов не представляла большой сложности. Внедрение MPLS означало внесение изменений только в программную часть устройств.

Значительным недостатком технологии была сложность конфигурации и необходимость использования большого количества сопутствующих протоколов для распространения маршрутной информации (протоколы состояний каналов **OSPF / IS-IS**), обмена метками (**LDP / RSVP**), а также организации управляющей плоскости (**MP-BGP / Target-LDP**). Таким образом, при использовании MPLS возникла дилемма:

простая организация работы плоскости передачи данных и достаточно трудоемкая организация работы управляющей плоскости.

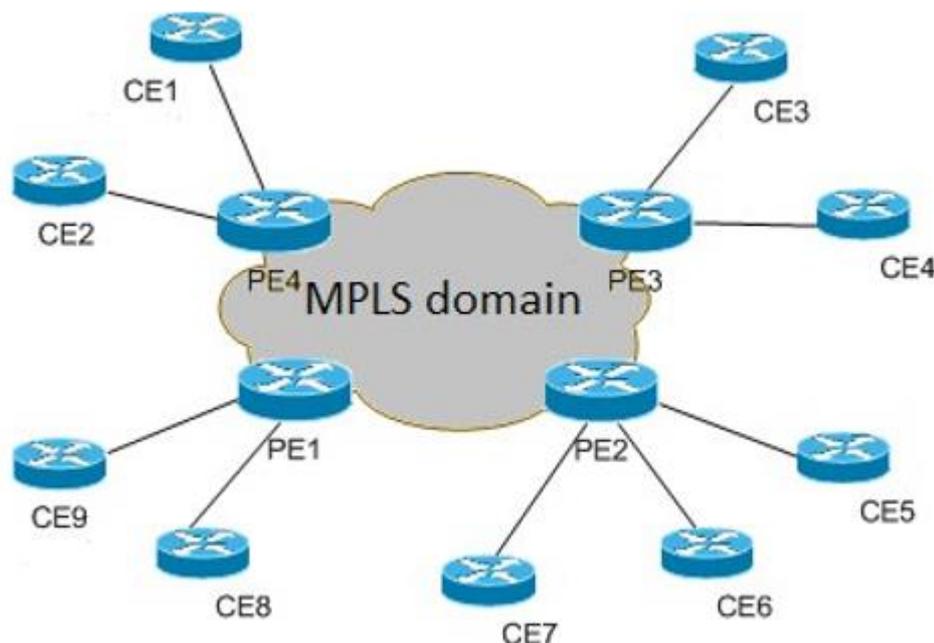


Рис. 1. Схема MPLS-домена и клиентских узлов

Технология Segment Routing может стать решением текущей проблемы упрощения работы управляющей плоскости, сохраняя при этом эффективность и простоту плоскости передачи данных [2].

В 2013 году компания Cisco Systems предложила разработку обновленной архитектуры построения сетей передачи данных, которая получила название Segment Routing (SR).

Технология SR основана на принципах маршрутизации с исходного узла (**source routing**) — возможности указывать путь прохождения пакетов на источнике с помощью последовательности сегментов в заголовке пакета. Сегмент обычно представляет собой описание или инструкцию для прохождения пакетов от одной точки к другой. Например, такая инструкция может требовать доставить пакет (набор пакетов) из точки А в точку В кратчайшим путем или по определенному маршруту. Таким образом, маршрутизаторы на пути следования пакета могут руководствоваться правилом, заранее записанным в заголовке пакета. В качестве меры обратной совместимости с MPLS рассматривалась возможность использования MPLS-меток (при передаче трафика в MPLS-сетях) или дополнительных IPv6 Routing Headers в случае работы только в IPv6-сетях. Благодаря сохранению простого и уже проверенного уровня передачи данных отсутствует необходимость пересмотра стандартной логики работы маршрутизаторов. Они продолжают работать с правилами push, pop и swap, как и в MPLS-сетях.

При формировании пути пакета инструкции для узлового оборудования записываются в заголовок — сегменты. Для описания пути пакета через сеть оператора (или нескольких операторов) необходима информация о:

- идентификаторах узлов (маршрутизаторов) на пути;
- идентификаторах интерфейсов этих узлов.

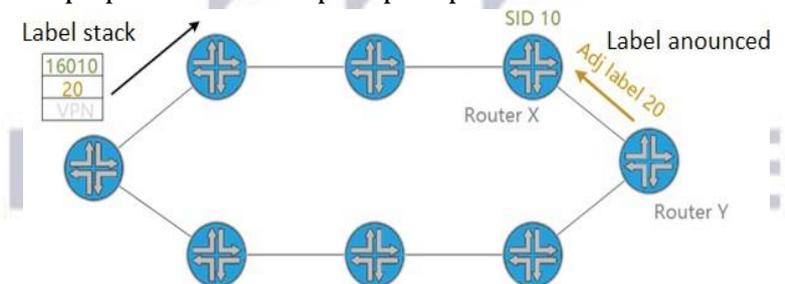
Как правило, эта информация относится к IGP-протоколам маршрутизации. Например, реализация протоколов OSPF и IS-IS предполагает хранение информации обо всех элементах сети и всех соединениях между этими элементами.

Идентификатор узла в терминологии SR называется Prefix / Node SID. Этот параметр задается при конфигурации маршрутизатора и, с точки зрения инструкций по доставке трафика, означает: «доставить пакет кратчайшим путем до нужного узла». Для назначения SR-меток используется выделенный диапазон, чтобы избежать конфликта с «классическими» протоколами. Этот диапазон называется **SRGB (Segment Routing Global Block)**. По умолчанию для платформы IOS XR диапазон **SRGB** составляет **16000-23999**.

Кратчайший путь обычно определяется с помощью IGP-протоколов маршрутизации. Чтобы определить метку конкретного устройства, к нижней границе SRGB добавляется SID, присвоенный устройству. Для промежуточного маршрутизатора в плоскости передачи данных получение Prefix / Node SID аналогично операции **swap**. Для определения целевого интерфейса маршрутизатора (**PE**) SR предоставляет **Adjacency SID**.

- **Adjacency SID** автоматически генерируется для каждого SR-соседа.
- Позволяет передавать трафик через **конкретный интерфейс**.
- Важно отметить, что это значение **уникально только в пределах одного маршрутизатора**.

При передаче трафика метки распространяются по сети с помощью **IGP-**



**протоколов маршрутизации.** В этом случае стек меток **Prefix / Node SID** и **Adjacency SID** будет уникальным, что позволяет задать **конкретное устройство и интерфейс** — такая схема показана на **Рисунке 2**.

### **Рис. 2. Использование SR со стеком меток Prefix / Node SID и Adjacency SID**

Таким образом, отпадает необходимость в дополнительных протоколах для распространения меток по сети, таких как LDP (Label Distribution Protocol) или RSVP (Resource ReSerVation Protocol) при использовании Segment Routing (SR).

SR позволяет упростить взаимодействие с управляющей плоскостью, снизить вероятность некорректной конфигурации сети по сравнению с LDP и RSVP, а также отказаться от использования дополнительных протоколов. Еще одним важным преимуществом SR является автоматическое балансирование трафика в случаях, когда метрики на разных маршрутах совпадают. Это особенно актуально в условиях растущего спроса на передачу данных по сети. Однако в некоторых случаях возникает необходимость резервирования пропускной способности, и здесь требуется использование PCE (Path Computation Element).

### **Контроллер PCE и его роль в SR**

Установка такого контроллера позволяет настраивать вычисление туннелей с различными атрибутами, включая атрибут пропускной способности.

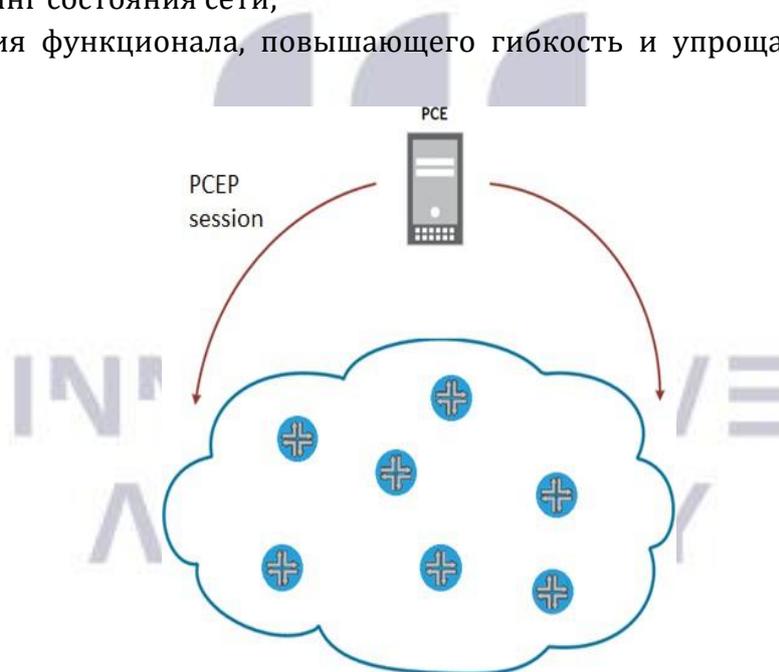
Контроллер PCE взаимодействует с сетевыми элементами, используя PCEP (Path Computation Element Communication Protocol).

Важно отметить, что PCE может использоваться в сети совместно с RSVP, LDP, а также даже при статическом назначении меток. В любом случае основная задача PCE — управление правилами передачи данных для сетевых устройств с использованием PCEP-протокола [3].

Схематическое представление этой концепции показано на Рисунке 3. Для вычисления маршрута контроллеру PCE необходима информация о топологии сети. Часто такая информация передается контроллеру путем подключения его к IGP-домену (включая данные о текущей топологии сети).

Основные преимущества PCE:

- Мониторинг нагрузки на интерфейсы и автоматический перенос трафика в случае сбоя;
- Мониторинг состояния сети;
- Реализация функционала, повышающего гибкость и упрощающего настройку



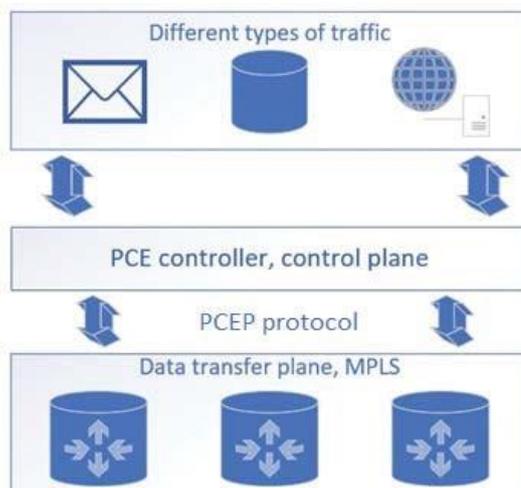
сети.

### Рис. 3. Схема сети с PCE-контроллером

Таким образом, PCE можно назвать контроллером программно-определяемой сети (SDN) поверх существующей MPLS-сети. Некоторые open-source SDN-проекты поддерживают протокол PCEP, например, контроллер Open Daylight [4]. Реализация принципов SDN для транспортной сети с SR позволяет достичь таких важных аспектов, как увеличение гибкости управления сетью, упрощение развертывания новых сервисов и их последующей настройки. Важно отметить, что внедрение PCE-контроллера в сеть не требует её полной модернизации и может работать поверх уже существующей плоскости передачи данных. Если описывать транспортные MPLS-сети с использованием SR с точки зрения SDN, то схема

взаимодействия плоскостей (передачи данных и управления) будет выглядеть следующим образом (Рис. 4).

**Рис. 4. Архитектура MPLS-транспортной сети с использованием PCE-контроллера**



Контроллер PCE в транспортной сети позволяет управлять маршрутом трафика таким образом, чтобы учитывать наиболее критичные аспекты для определенного типа трафика [5].

Например, для трафика, требующего максимально возможной пропускной способности, из нескольких возможных маршрутов будет выбран наиболее подходящий.

### **Применение SR**

В качестве примера использования технологии SR рассмотрим сеть определенного оператора, состоящую из 300 маршрутизаторов. Каждый маршрутизатор подключен к соседним маршрутизаторам через 5 интерфейсов. В этом случае, если учитывать все возможные маршруты передачи трафика в сети (full mesh), то при использовании SR в данной сети таблица коммутации на каждом маршрутизаторе будет содержать всего 305 записей. Эти записи включают 300 Prefix / Node SID и 5 Adjacency SID. На каждом маршрутизаторе такая таблица будет неизменной и конечной, так как она не зависит от количества маршрутов передачи трафика и отражает только количество маршрутизаторов в данной сети и количество соединений между ними. Различные потоки трафика в сети будут иметь разные значения сегментов и отличаться по размеру стека, однако таблица коммутации не изменится и не будет зависеть от количества потоков.

В случае решения аналогичной задачи с использованием OpenFlow (или других протоколов), каждый поток трафика необходимо будет запрограммировать на каждом маршрутизаторе [6]. Это практически не масштабируемое решение. Аналогичная ситуация возникнет при использовании RSVP TE, а также наиболее распространенного подхода MPLS с Full Mesh RSVP TE. Для каждого TE-туннеля будет существовать отдельная запись в таблице коммутации (TE midpoint) на промежуточных маршрутизаторах, что может повлиять на конечную масштабируемость.

Еще один важный аспект – отказоустойчивость такого решения: при разрыве связи между маршрутизаторами начнется активный обмен управляющими сообщениями (с активной перестройкой RSVP-туннелей), и ресурсы управляющей плоскости будут

активно задействованы в этом процессе, рассчитывая наиболее оптимальные маршруты.

Вторым, не менее актуальным примером, является использование архитектуры SR в программно-определяемых сетях. Рассмотрим следующую ситуацию: необходимо обеспечить определенную пропускную способность для приложения (например, 2 Гбит/с) через сеть оператора. Связующим звеном между приложением и сетью оператора выступает SDN-контроллер, который анализирует требования приложения и одновременно обладает информацией о топологии сети и загрузке каналов [7]. Такой контроллер может представлять собой:

- Контроллер на основе одного из Open Source решений (например, Open Daylight);
- Проприетарное решение вендора.

Примером проприетарного решения является контроллер WAN Automation Engine от Cisco Systems [8]. Этот контроллер предоставляет необходимые API (интерфейсы программирования приложений) для различных приложений и клиентских сервисов. WAN Automation Engine позволяет балансировать нагрузку между различными каналами, используя вышеупомянутый протокол PCEP. Разумеется, RSVP позволяет реализовать аналогичную функциональность, однако балансировка возможна только между туннелями, созданными вручную, в то время как SR значительно автоматизирует этот процесс.

Проанализировав требуемую приложением пропускную способность и основываясь на информации о текущем состоянии сети (например, при перегрузке канала между определенными маршрутизаторами), контроллер может вычислить подходящий маршрут для трафика в сети и передать маршрутизатору сигнал о необходимости использования определенного стека меток. Этот стек меток будет применен к потоку трафика от приложения. Для различных типов приложений набор требований к сети может различаться, а значит, и маршруты трафика будут разными. В этом случае контроллер сможет формировать необходимый набор сегментов каждый раз максимально гибко. Такая связка контроллера и технологии SR позволяет не изменять топологию и не требует перепрограммирования каждого маршрутизатора для передачи трафика от приложений с требуемым приоритетом. Благодаря централизованному управлению сетью практически исключается ситуация «бури» сигнальных сообщений, а их общее количество существенно уменьшается.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В заключение следует отметить, что сети передачи данных постоянно развиваются на протяжении всего своего существования. Технология Segment Routing, возможно, является следующим эволюционным шагом после MPLS. О востребованности таких технологий свидетельствует интерес со стороны операторов связи, магистральных провайдеров, крупных корпоративных клиентов и других участников рынка.

Неоспоримым преимуществом SR является возможность работы в рамках концепции SDN без необходимости кардинального обновления парка оборудования (за исключением оборудования без поддержки MPLS, а также в некоторых случаях оборудования старше 4-5 лет), что снижает требования к внедрению. Не менее важным

преимуществом является возможность использования меньшего количества сопутствующих протоколов и технологий. Значительное упрощение настройки управляющей плоскости и уменьшение объема передаваемой служебной информации делает технологию привлекательной для конечного клиента [9].

Наиболее значимые области применения технологии:

- Упрощение работы операторских сетей. Возможность отказа от нескольких дополнительных протоколов играет в этом случае ключевую роль.
- Быстрое изменение маршрута. SR может применяться в сетях провайдеров, предлагающих критически важные сервисы, требующие быстрого восстановления передачи данных.
- Управление трафиком в сети SR. Это один из наиболее распространенных сценариев использования технологии Segment Routing благодаря ее простоте и масштабируемости. В настоящее время управление трафиком в MPLS редко применяется в крупных провайдерских сетях из-за высокой сложности.
- SR может использоваться в централизованной, распределенной или гибридной среде. В распределенном сценарии сегменты назначаются и сигнализируются через IS-IS, OSPF или BGP. В централизованном сценарии сегменты назначаются и мгновенно создаются контроллером SR (SDN-контроллером).
- Улучшение программируемости сети при использовании в IPv6. Благодаря концепции набора инструкций SR расширяет возможности программирования сети.
- Перспективное применение в сетях 5G. Вплоть до замены SR в версии IPv6 (SRv6) транспортного протокола туннелирования пользовательской плоскости (GTP-U), используемого в мобильных сетях с момента внедрения LTE.

Таким образом, широкий спектр возможностей применения SR в различных сетях, гибкость масштабирования и простота делают эту технологию очень перспективной.

#### Литература:

1. Гольдштейн А., Гольдштейн Б. Технология и протоколы MPLS. Санкт-Петербург: BHV, 2005.
2. Segment Routing. n.d. Segment Routing. [online] Available at: <<https://www.segment-routing.net/>> [Доступ 7 февраля 2021].
3. Tools.ietf.org. n.d. RFC 5440 - Path Computation Element (PCE) Communication Protocol (PCEP). [online] Available at:
4. <<https://tools.ietf.org/html/rfc5440>> [Доступ 11 февраля 2021].
5. OpenDaylight. n.d. Current Release: Aluminum - OpenDaylight. [online] Available at: <<https://www.opendaylight.org/current-release-aluminium>> [Доступ 15 февраля 2021].
6. Support.huawei.com. n.d. Segment Routing - Huawei EDOC1100092117. [online] Available at: <[https://support.huawei.com/enterprise/en/doc/ EDOC1100092117](https://support.huawei.com/enterprise/en/doc/EDOC1100092117)> [Доступ 20 февраля 2021].
7. Калмыков Н., Докучаев В. Применение концепции программно-определенных сетей для разработки географически распределенных сетей // Телекоммуникации и информационные технологии, 2020. №7 (2). С. 51-56.
8. Калмыков Н., Докучаев В. Анализ протоколов, реализующих технологию SDN // Телекоммуникации и информационные технологии, 2020.
9. №7 (1). С.19-25.

10. Cisco WAN Automation Engine (WAE). [online] Cisco. Available at: <<https://www.cisco.com/c/en/us/products/routers/wan-automation-engine/index.html>> [Доступ 21 февраля 2021].
11. Ray Mota 2018. Segment Routing with Use Cases. [online] Available at: <[https://www.researchgate.net/publication/327515548\\_Segment\\_Routing\\_with\\_Use\\_Cases](https://www.researchgate.net/publication/327515548_Segment_Routing_with_Use_Cases)> [Доступ 26 февраля 2021].

