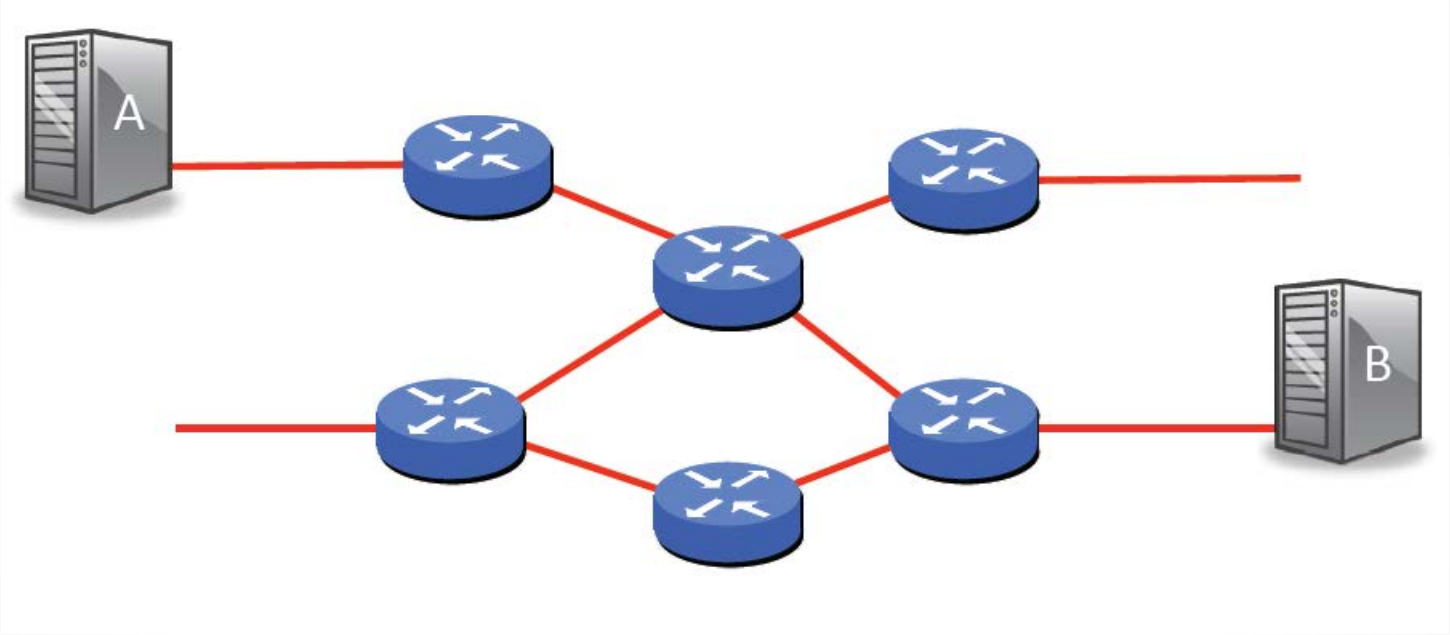
Основы маршрутизации в Интернет

(том 2 стр.30-52)

Введение в компьютерные сети

проф. Смелянский Р.Л.
Лаборатория Вычислительных комплексов
ф-т ВМК МГУ

Проблема



- Как пакеты из A достигнут B?

Основы

Подходы

- Лавиной
- От источника
- Таблица коммутации
- Соединяющее дерево

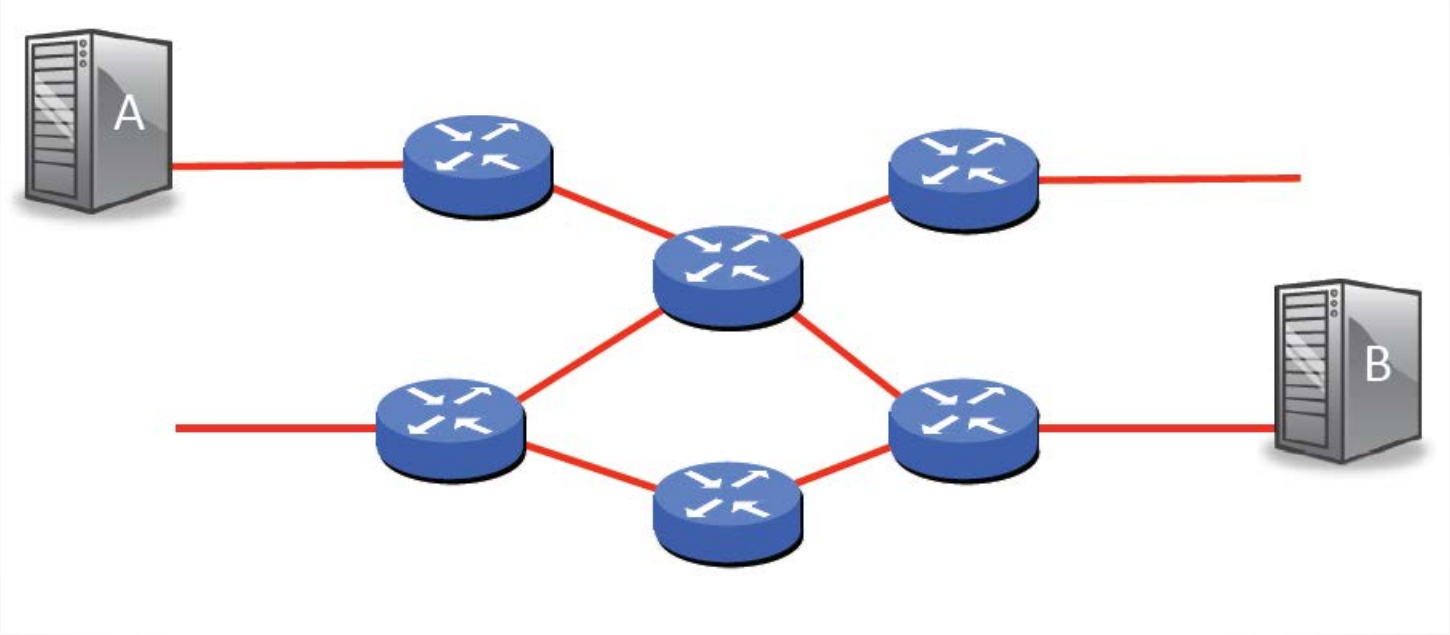
Метрики

Соединяющие деревья наикратчайшего пути

Другие типы маршрутизации

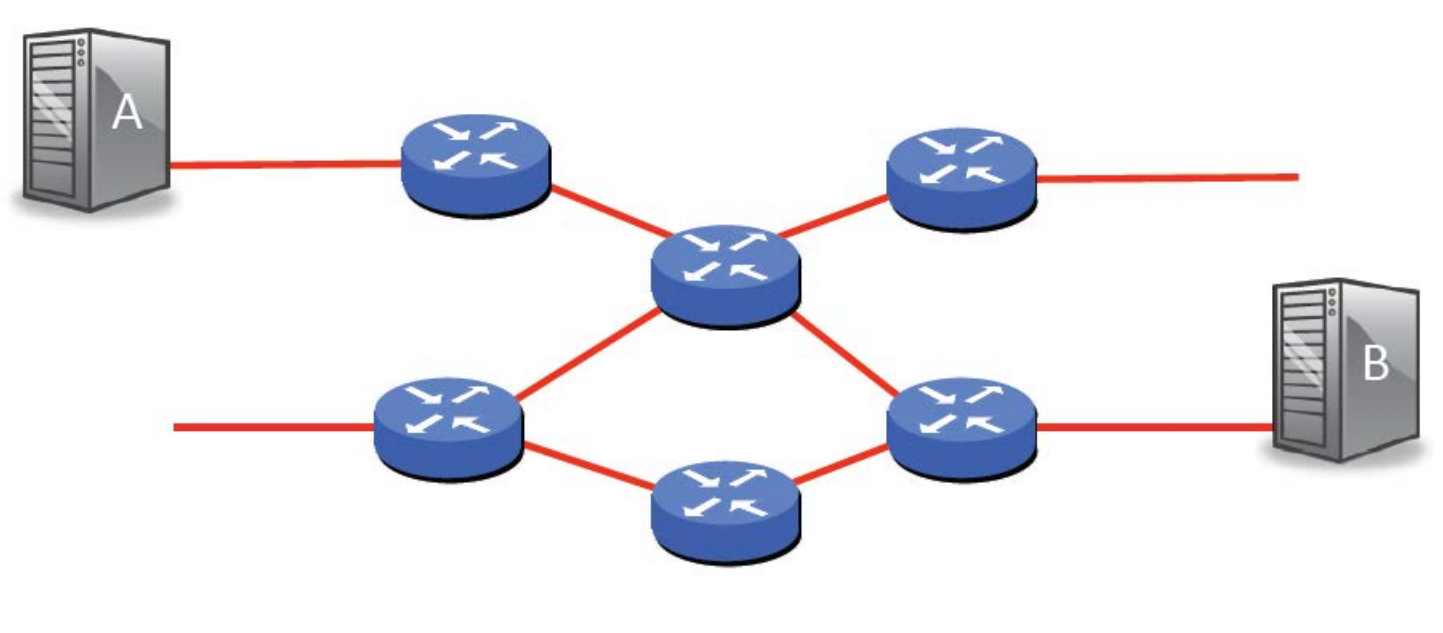
- по множеству путей
- групповая

Лавина



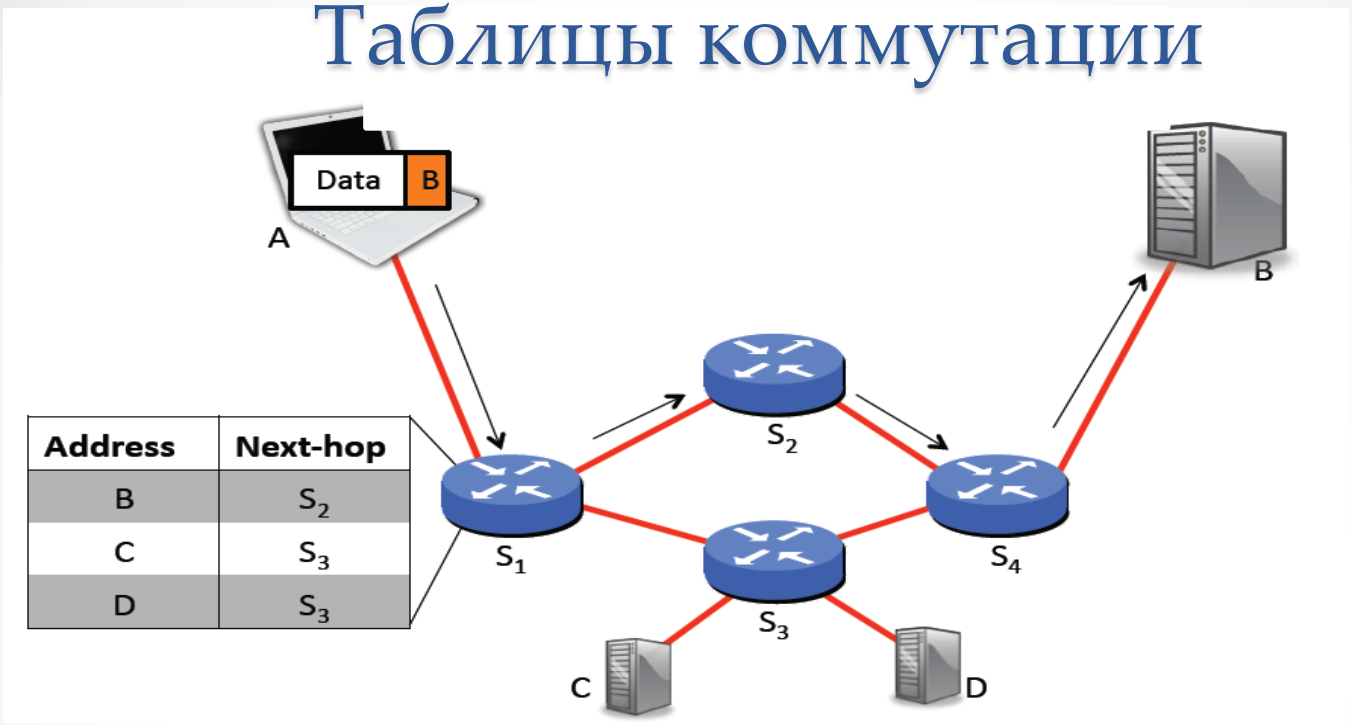
- Не эффективное использование линий
- Пакеты могут зацикливаться
- Используется когда топология не известна (или ей нельзя доверять)

Маршрутизация от источника



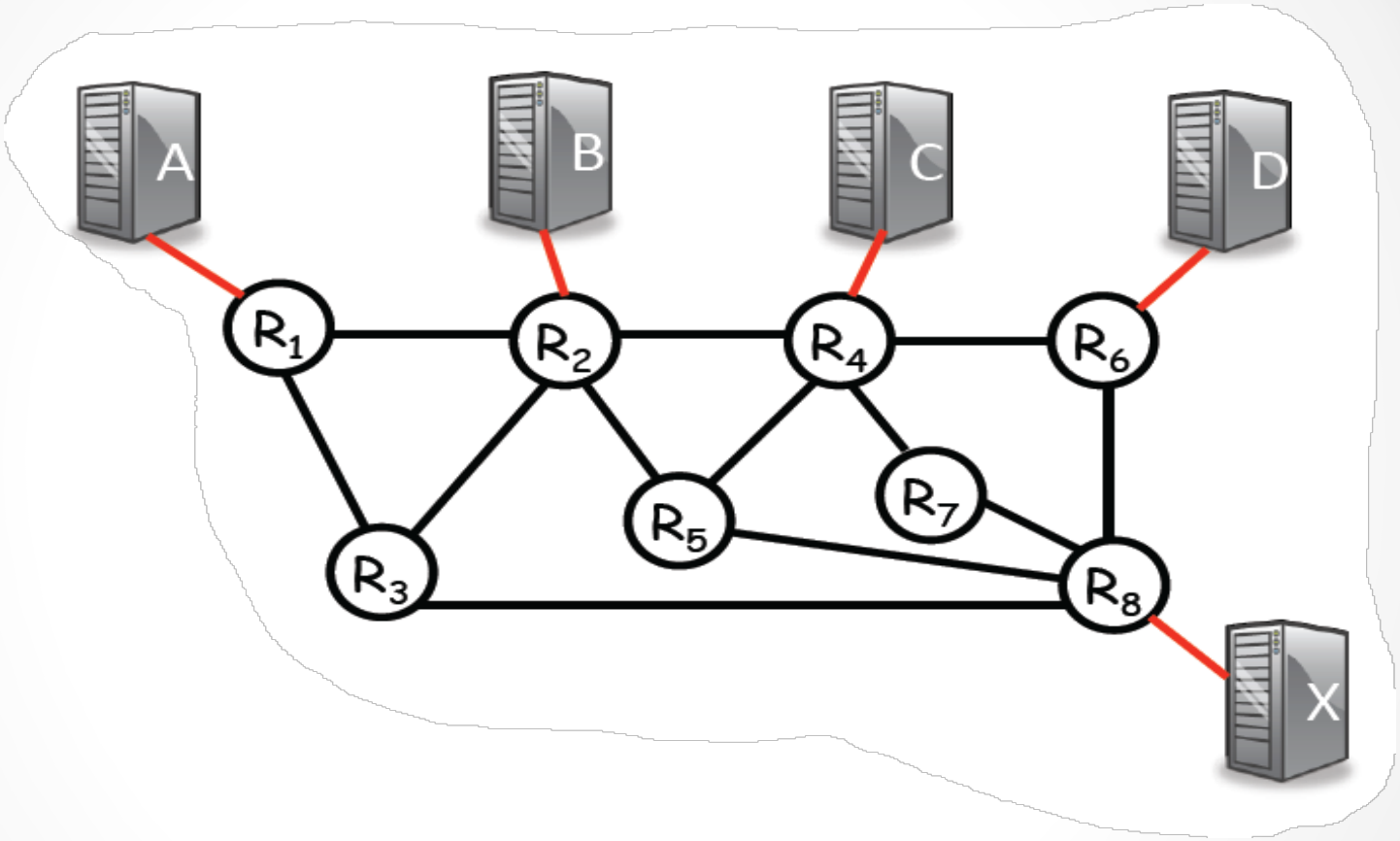
- Не требует поддержки от сети
- Пакеты содержать списки адресов, переменной длины
  (могут быть очень длинными)
- Выбор маршрута на конечной хосте, который должен знать топологию
- Используется когда пользователь хочет сам управлять маршрутизацией

Таблицы коммутации



- Оптимизация: сеть маршрутизирует по скачкам
- Необходимо много таблиц коммутации
- Состояния от места назначения, а не от потока

Соединяющие деревья

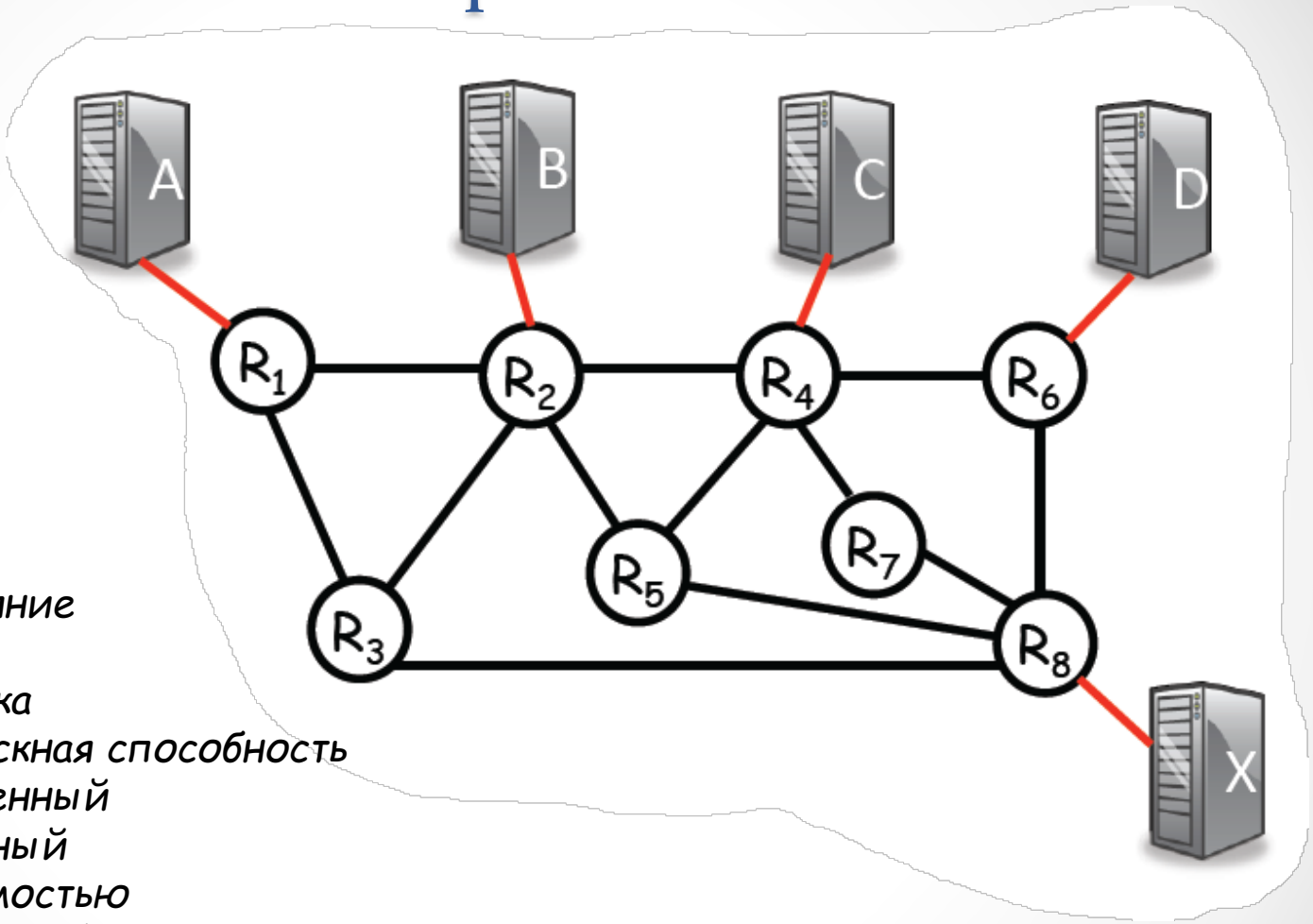


Соединяющее дерево

соединяющее – все листья достижимы

дерево – нет циклов

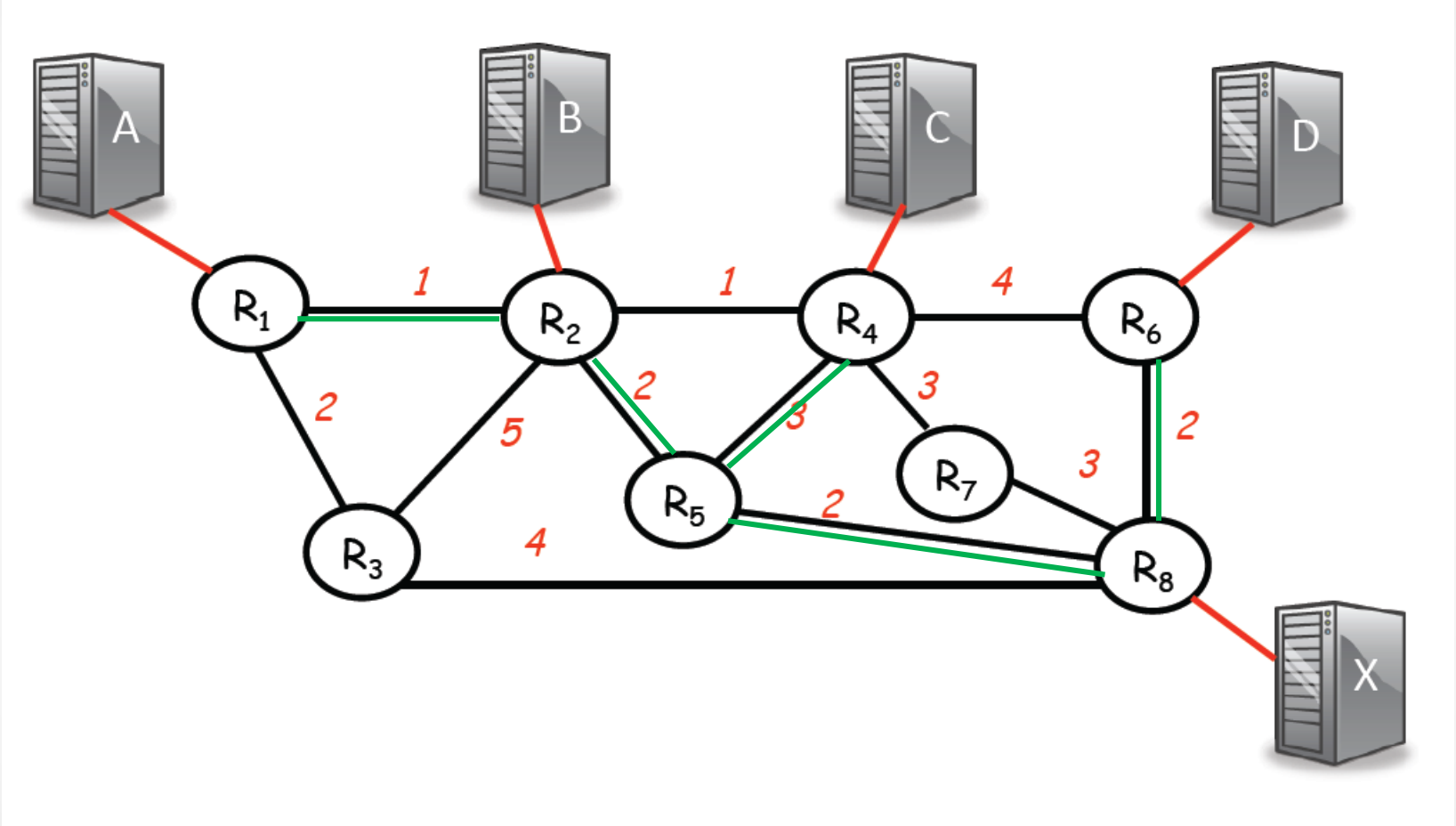
Метрики



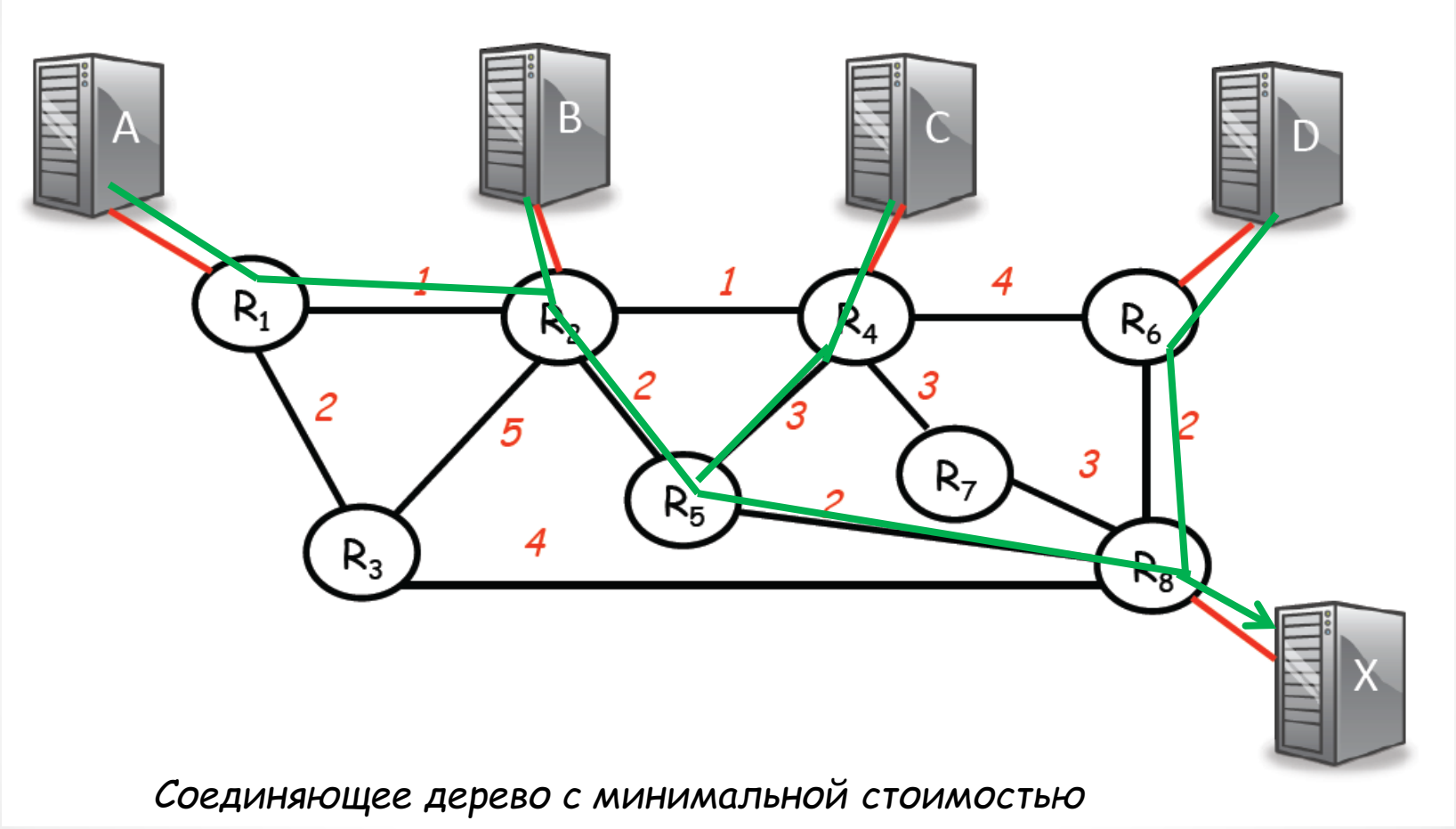
Метрики:

- *мин. расстояние*
- *мин. скачки*
- *мин. задержка*
- *макс. пропускная способность*
- *мин. загруженный*
- *макс. надежный*
- *с мин. стоимостью*
- *макс. безопасный*
- *…*

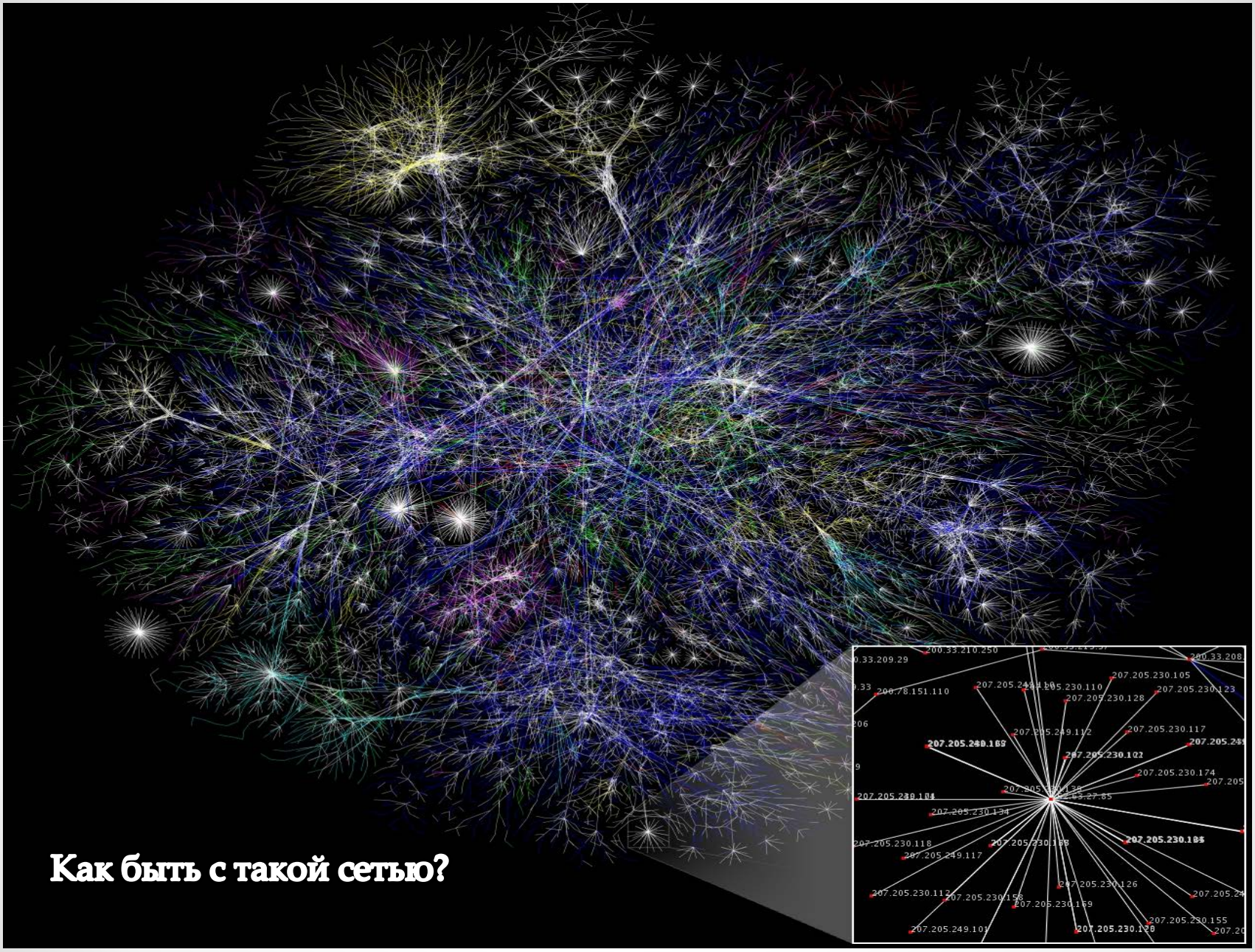
Пример взвешенного графа



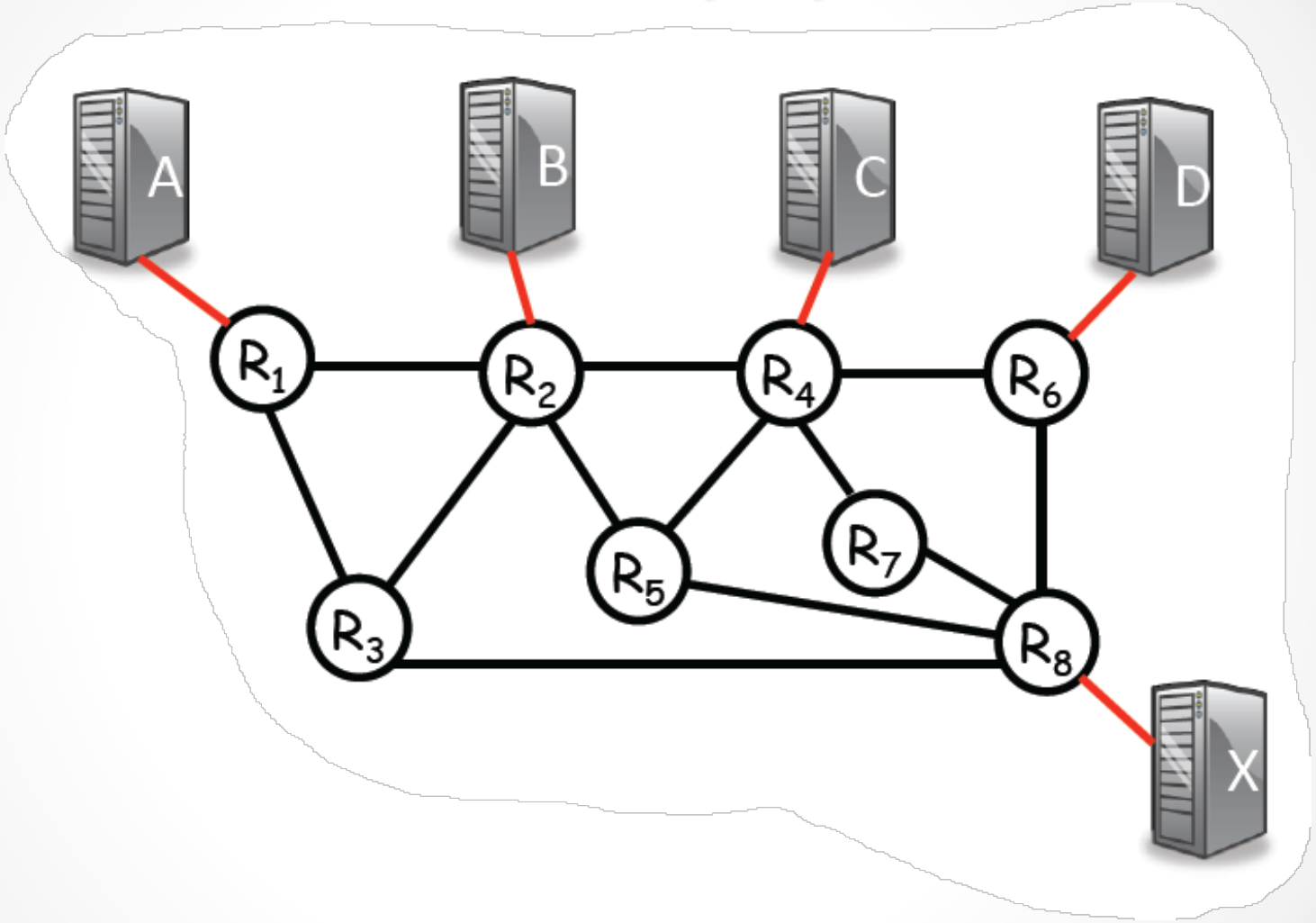
Пример взвешенного графа



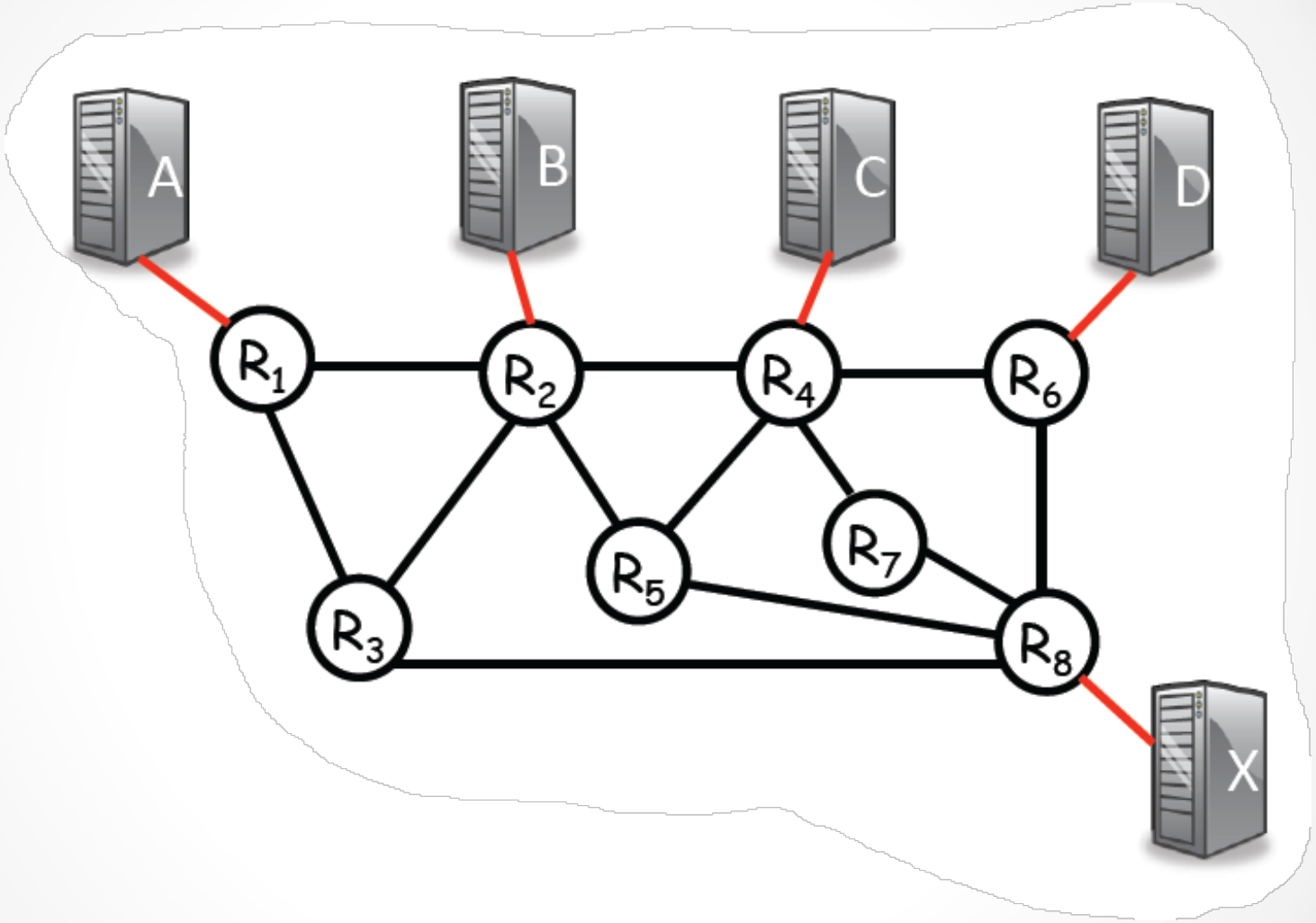
Соединяющее дерево с минимальной стоимостью


Как быть с такой сетью?

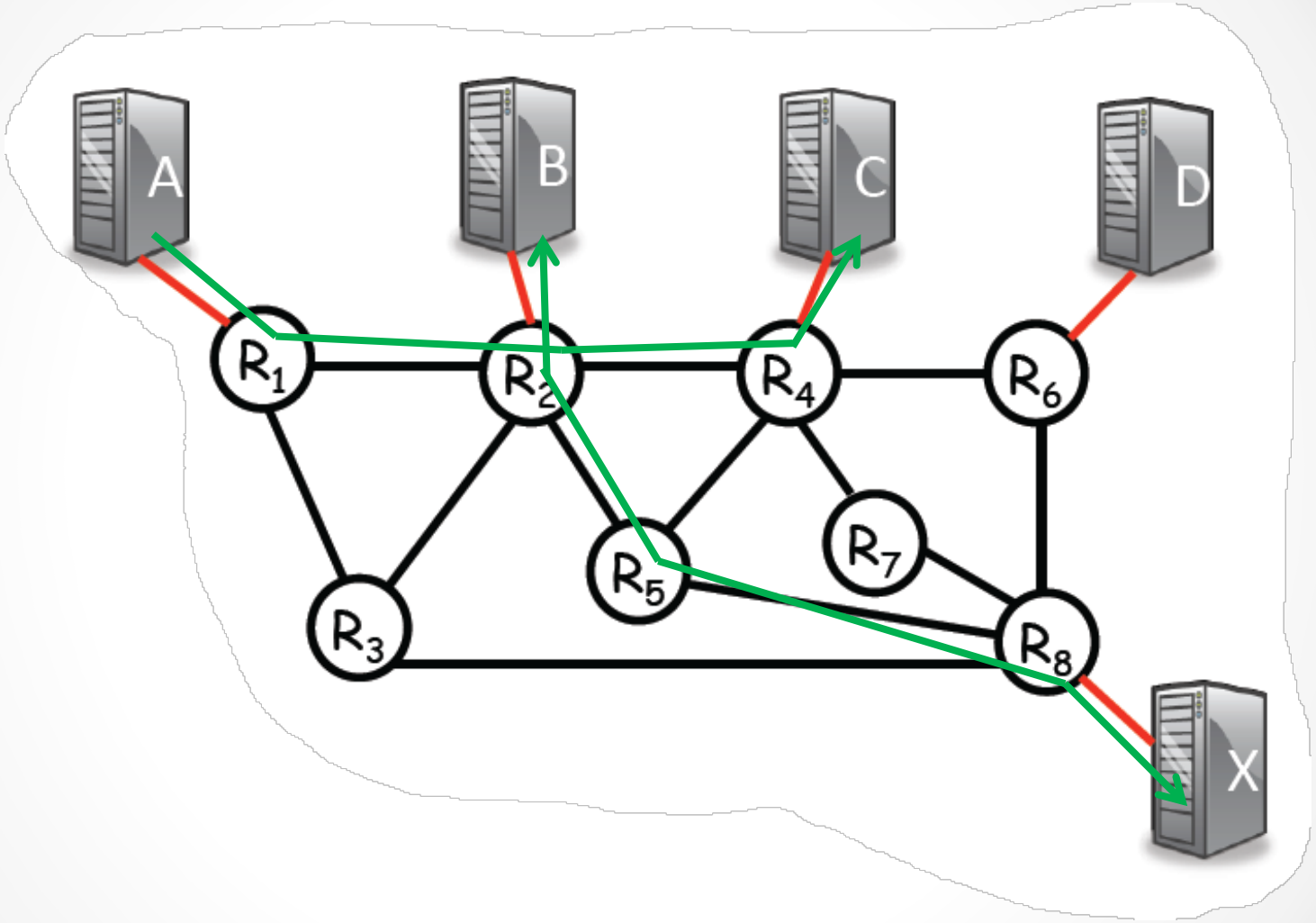
По множеству путей



Групповая



Групповая



Маршрутизация по вектору расстояния: алгоритм Белмана-Форда

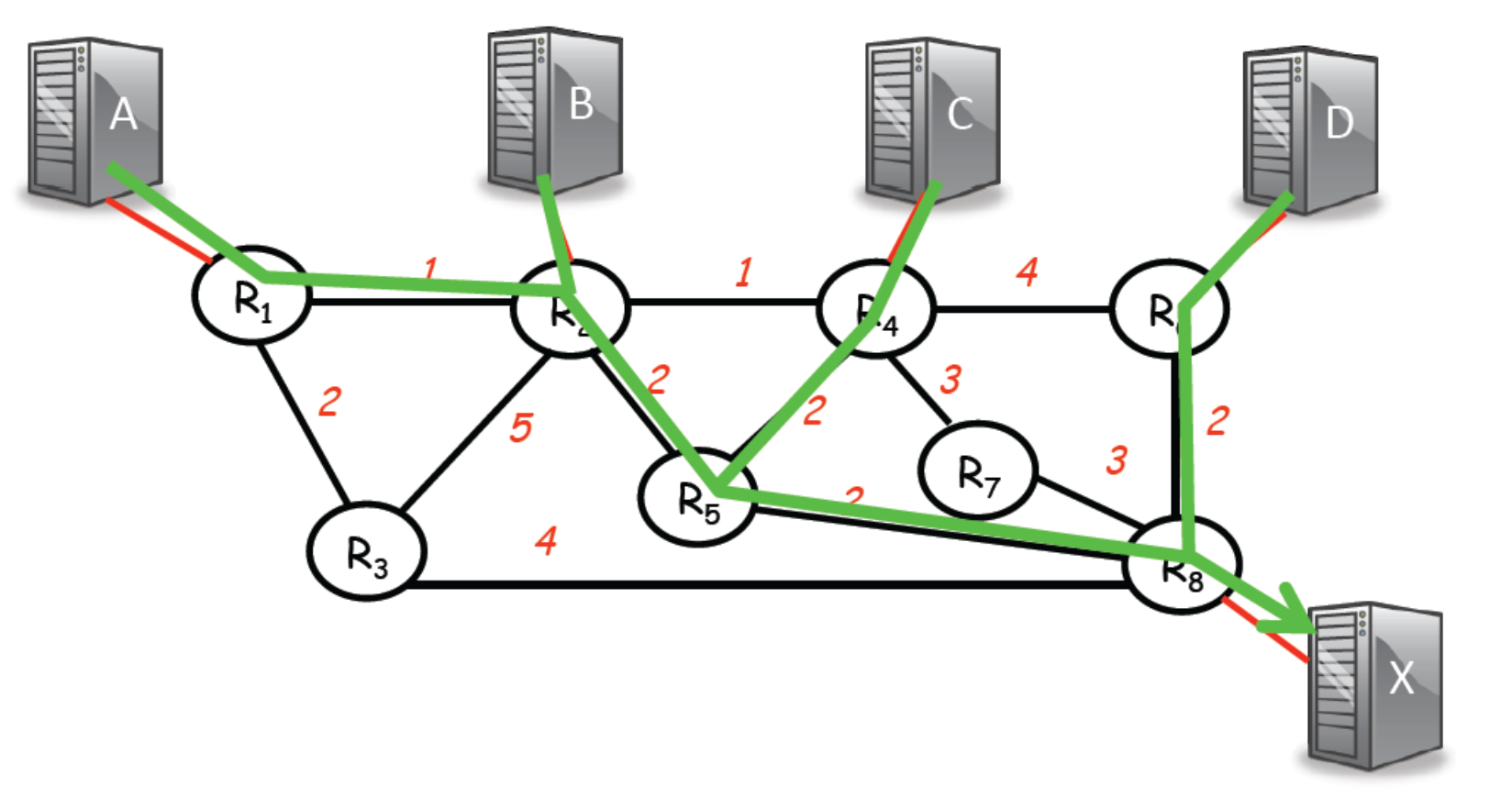
(том 2 стр.38-41)

Компьютерные сети

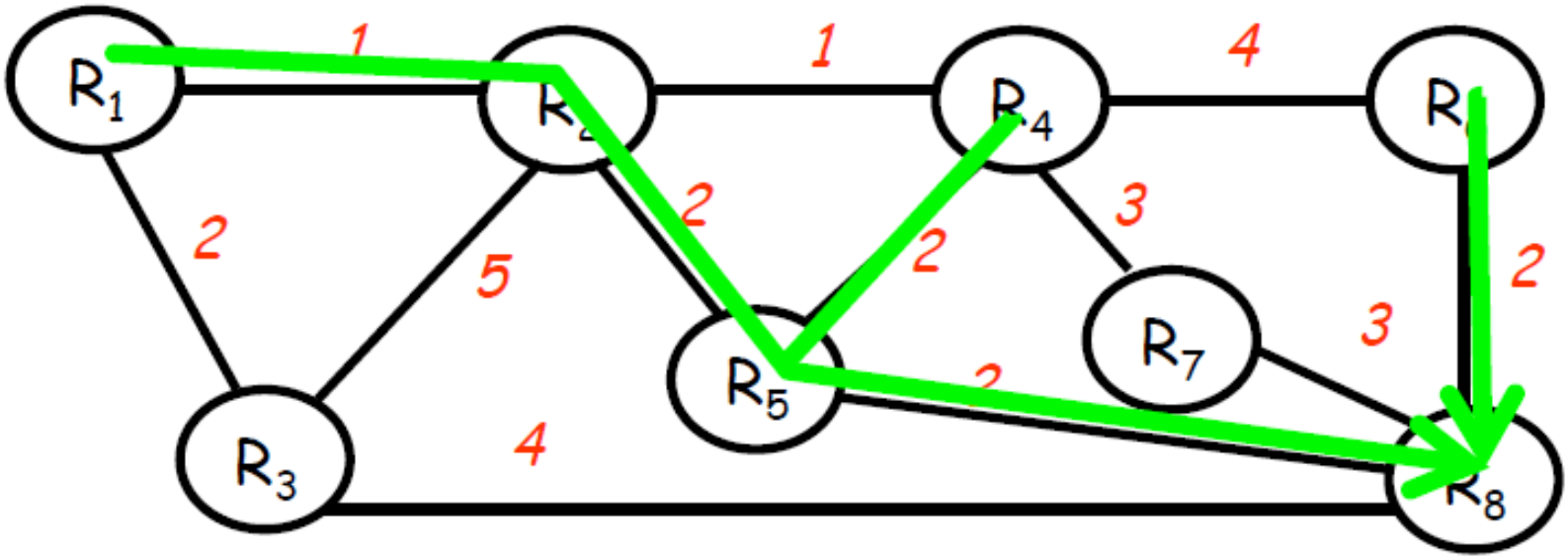
проф. Смелянский Р.Л.
Лаборатория Вычислительных комплексов
ф-т ВМК МГУ

Проблема

Как маршрутизаторам могут совместно найти соединяющее дерево минимальной стоимости?



Эквивалентно нахождению соединяющего дерева минимальной стоимости только среди маршрутизаторов

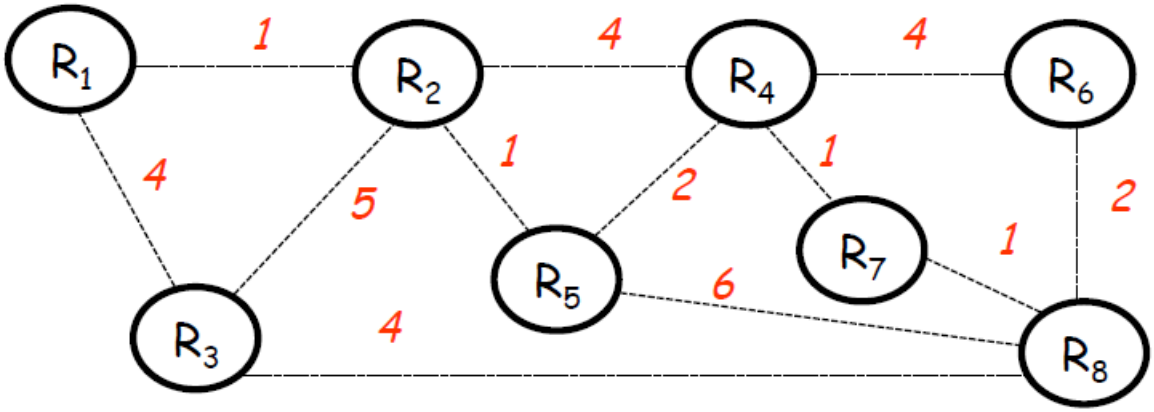


Распределенный алгоритм Беллмана-Форда (т.2 стр.38-48)

- Пусть каждый маршрутизатор знает стоимость линии к каждому своему соседу
- Маршрутизатор R_8 рассчитывает стоимость C_i для достижения R_i
- Вектор $\underline{C_8} = (C_1, C_2, \ldots, C_7)$ – вектор расстояния до R_8
- Изначально $\underline{C} = (\infty, \infty, \ldots, \infty)$

1. Каждые T секунд, R_i шлет C_i всем своим соседям
2. Если R_i нашел более дешевый пусть, то он обновляет C_i у всех своих соседей
3. Вернуться к 1

Пример



R_1	∞
R_2	∞
R_3	∞
R_4	∞
R_5	∞
R_6	∞
R_7	∞

шаг 0

R_1	∞
R_2	∞
R_3	**4**
R_4	∞
R_5	**6**
R_6	**2**
R_7	**1**

шаг 1

R_1	$8,R_3$
R_2	$7,R_5$
R_3	4
R_4	$2,R_7$
R_5	6
R_6	2
R_7	1

шаг 2

R_1	$8,R_3$
R_2	$6,R_4$
R_3	4
R_4	$2,R_7$
R_5	$4,R_4$
R_6	2
R_7	1

шаг 3

R_1	$7,R_2$
R_2	$5,R_5$
R_3	4
R_4	$2,R_7$
R_5	$4,R_4$
R_6	2
R_7	1

шаг 4

R_1	$6,R_4$
R_2	$5,R_5$
R_3	4
R_4	$2,R_7$
R_5	$4,R_4$
R_6	2
R_7	1

шаг 5

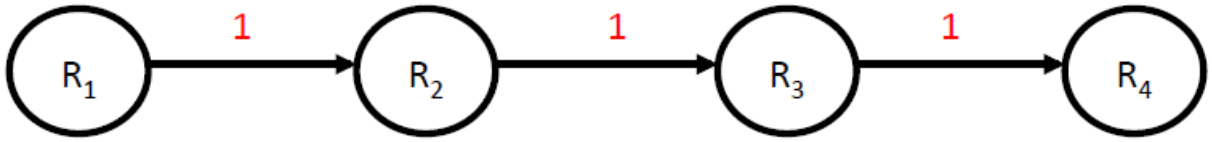
Алгоритм Беллмана-Форда

Вопросы:

1. *Каково максимальное время работы алгоритма?*
2. *Всегда ли алгоритм будет сходиться?*
3. *Что будет если измениться стоимость линии, или отключится маршрутизатор/линия?*

Проблемы с алгоритмом Б-Ф

Плохие вести распространяются медленно



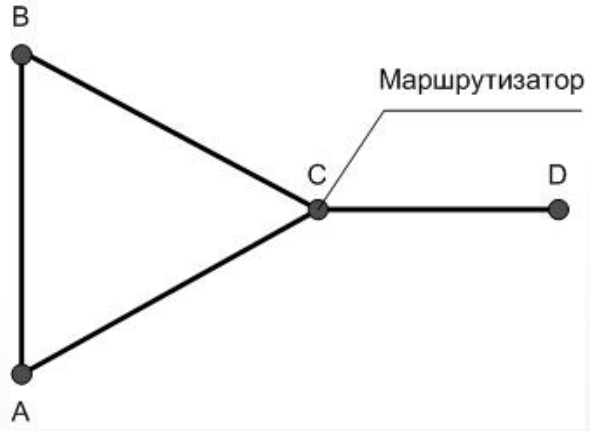
Рассмотрим расчет расстояния для R3 до R4

Time	R_1	R_2	R_3
0	3,R_2	2,R_3	1, R_4
1	3,R_2	2,R_3	3,R_2
2	3,R_2	4,R_3	3,R_2
3	5,R_2	4,R_3	5,R_2
…	*Итак до бесконечности*		…

Линия R3 - R4 не действует

Проблема счетчика до бесконечности

- *Установить ограничение на «бесконечность» (e.g. 16)*
- *Разделение направлений: т.к. R_2 получает данные о маршруте с наименьшей стоимостью от R_3, то запретить R_2 сообщать R_3 о маршрутах, проходящих через R_3*
- *Разделение направлений с бесконечностью: R_2 посылает R_3 ∞*
- *Есть и другие проблемы, связанные с алгоритмом Б-Ф*



Беллман-Форд на практике

- *Алгоритм Беллмана-Форда - пример алгоритма по вектору расстояния*
- *Этот алгоритм использовался в первых Интернет протоколах маршрутизации RIP (Routing Internet Protocol)*
- *Он не требует больших вычислений, распределенный и , в конечном счете, сходится*
- *Со временем он был вытеснен алгоритмами, которые рассчитывали соединяющее дерево для каждого маршрутизатора*

Маршрутизация по состоянию канала: алгоритм наикратчайшего пути Дейкстры

(том 2 стр.33, 41-46)

Введение в компьютерные сети

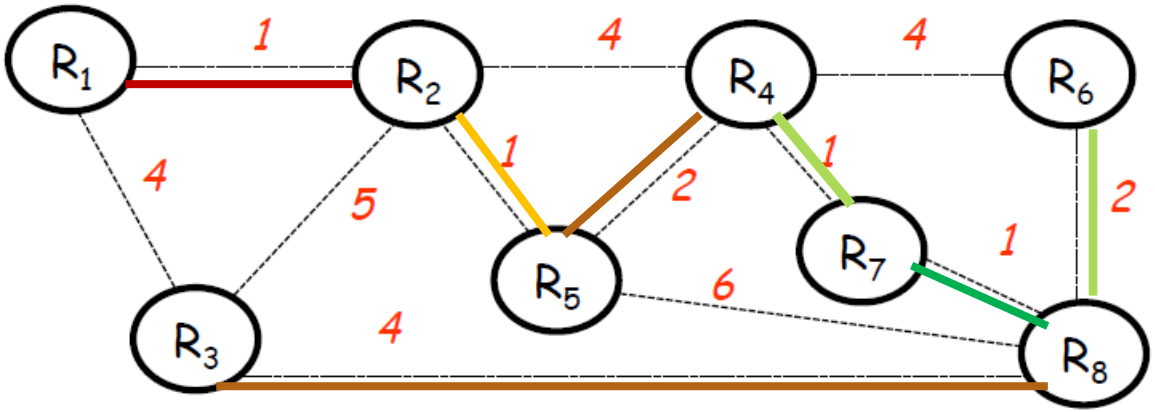
проф. Смелянский Р.Л.
Лаборатория Вычислительных комплексов
ф-т ВМК МГУ

Первый алгоритм Дейкстры наикратчайшего пути

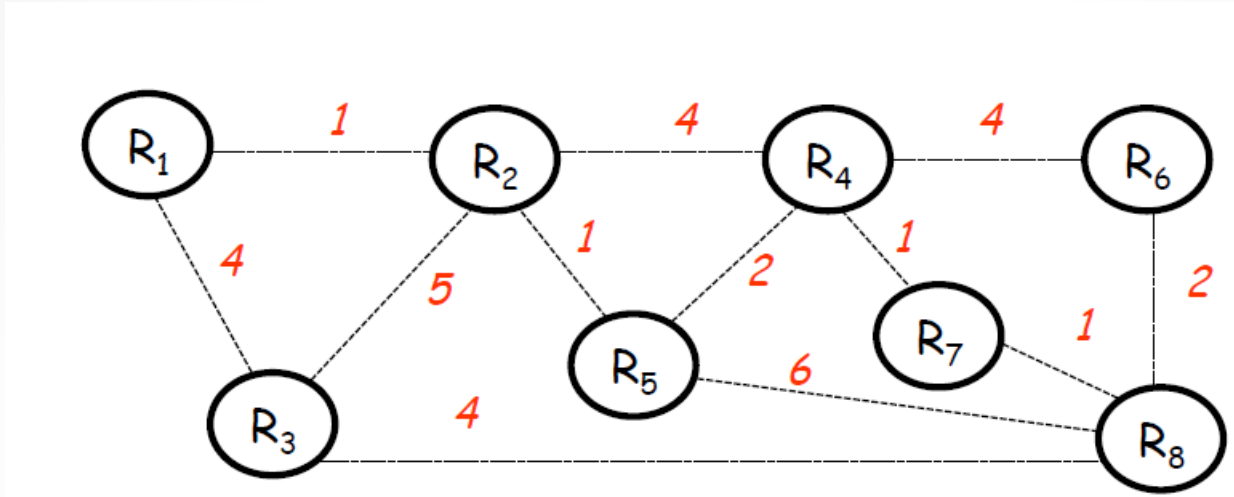
1. *Обмен состояниями линий: Маршрутизатор передает лавиной всем другим маршрутизаторам состояния своих линий*
   - *Периодически*
   - *Когда изменяется состояние линии*
2. *Вычисление по алгоритму Дейкстры: каждый маршрутизатор независимо запускает алгоритм Дейкстры наикратчайшего пути.*

Каждый маршрутизатор находит соединяющее дерево с минимальной стоимостью до каждого другого маршрутизатора

Пример для R8

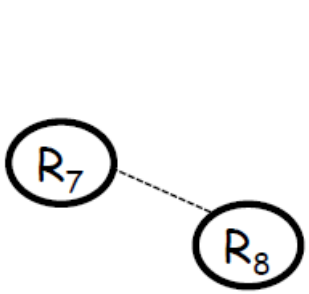


Пример для R8

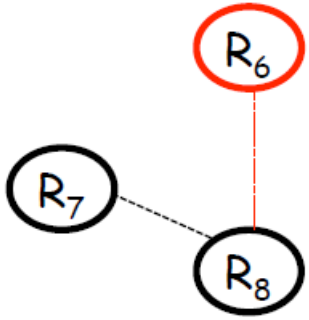


Добавляем путь стоимости

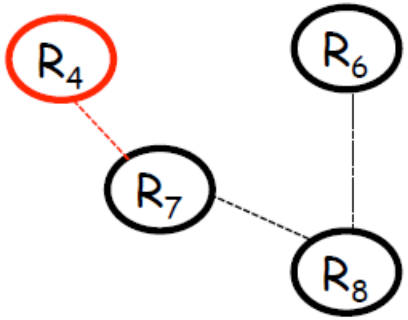
1



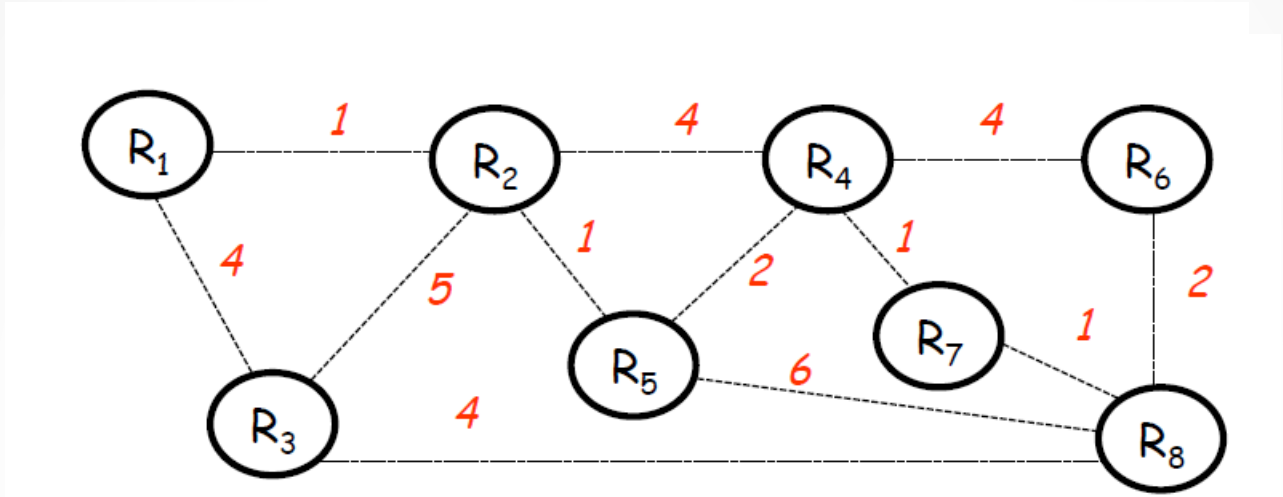
2



2

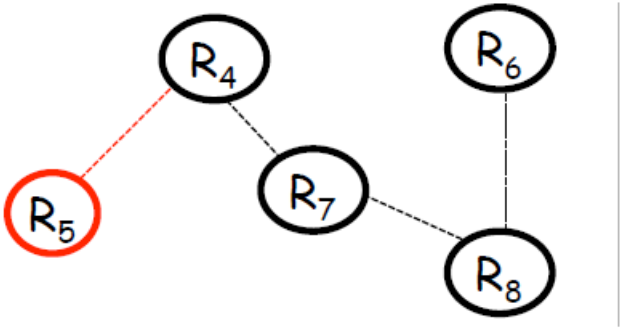


Пример для R8

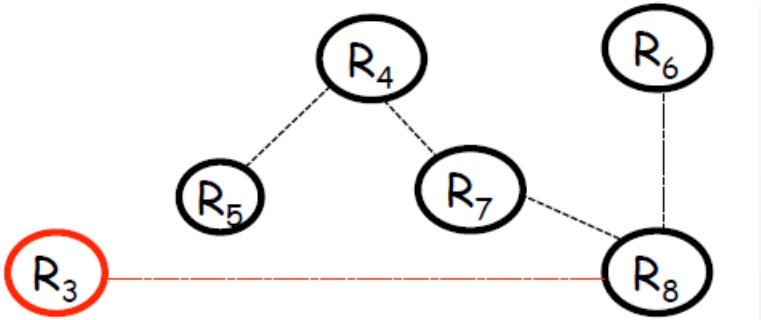


Добавляем путь стоимости

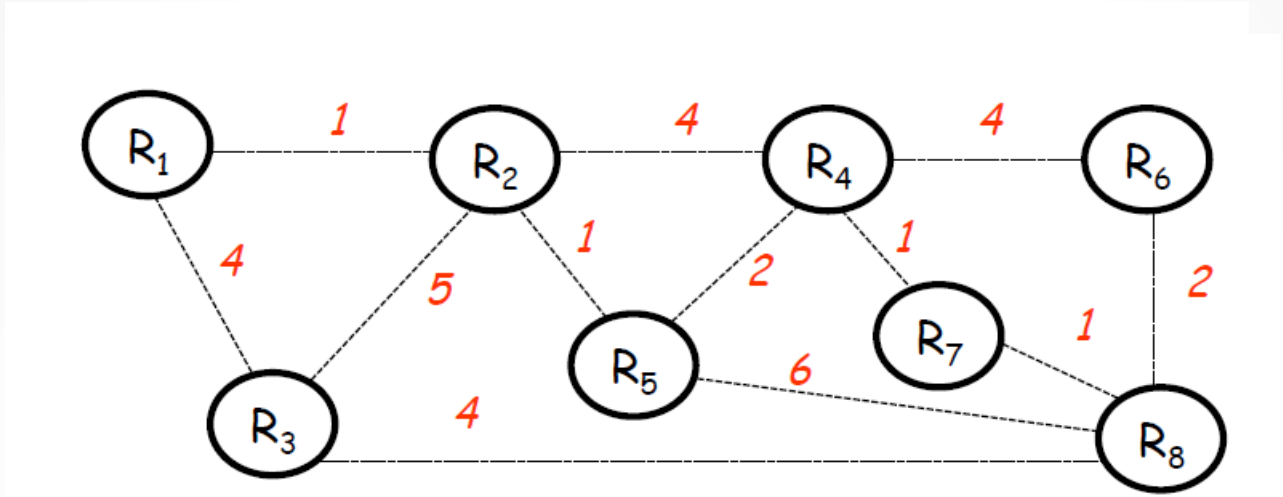
4



4

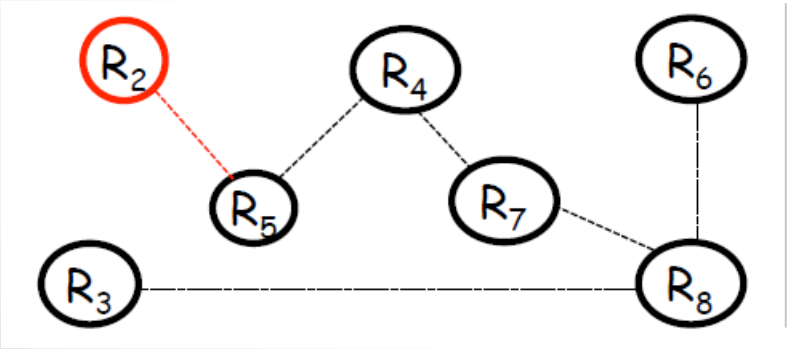


Пример для R8

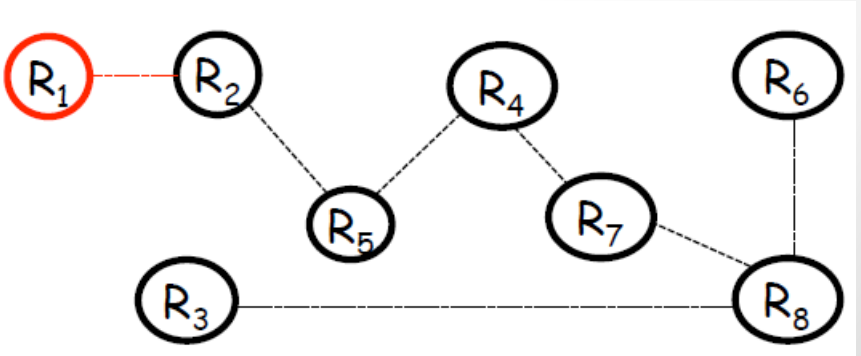


Добавляем путь стоимости

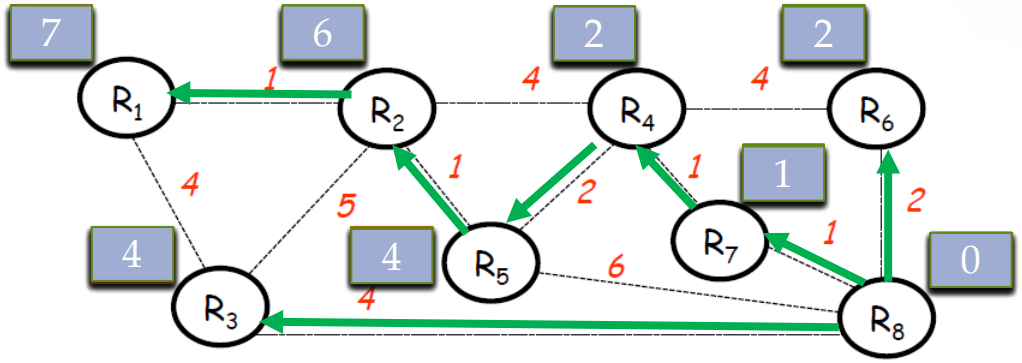
5



6



Алгоритм



	0	1	2	3	4	5	6	7
Пройден		R_8	R_8, R_7	R_8, R_7, R_6	R_8, R_7, R_6, R_4	R_8, R_7, R_6, R_4, R_3	$R_8, R_7, R_6, R_4, R_3, R_5$	$R_8, R_7, R_6, R_4, R_3, R_5, R_2$
Веса	$R_1=\infty$ $R_5=\infty$ $R_2=\infty$ $R_6=\infty$ $R_3=\infty$ $R_7=\infty$ $R_4=\infty$ $R_8=0$	$R_1=\infty$ $R_5=6$ $R_2=\infty$ $R_6=2$ $R_3=4$ $R_7=1$ $R_4=\infty$ $R_8=0$	$R_1=\infty$ $R_5=6$ $R_2=\infty$ $R_6=2$ $R_3=4$ $R_7=1$ $R_4=2$ $R_8=0$	$R_1=\infty$ $R_5=6$ $R_2=\infty$ $R_6=2$ $R_3=4$ $R_7=1$ $R_4=2$ $R_8=0$	$R_1=\infty$ $R_5=4$ $R_2=6$ $R_6=2$ $R_3=4$ $R_7=1$ $R_4=2$ $R_8=0$	$R_1=8$ $R_5=4$ $R_2=6$ $R_6=2$ $R_3=4$ $R_7=1$ $R_4=2$ $R_8=0$	$R_1=8$ $R_4=2$ $R_2=6$ $R_6=2$ $R_5=4$ $R_7=1$ $R_3=4$ $R_8=0$	$R_1=7$ $R_4=2$ $R_2=6$ $R_6=2$ $R_3=4$ $R_7=1$ $R_5=4$ $R_8=0$
Смежны	$R_3=4$ $R_7=1$ $R_5=6$ $R_6=2$	$R_4=2$	$R_4=2<6=>R_4=2$	$R_5=6>4=>R_5=4$ $R_2=\infty>6=>R_2=6$	$R_1=\infty>8=>R_1=8$ $R_2=6<9=>R_2=6$	$R_2=6<7=>R_2=6$	$R_1=8>7=>R_1=7$	
Выбираем	$R_8=0$	$R_7=1$	$R_6=2$	$R_4=2$	$R_3=4$	$R_5=4$	$R_2=6$	Стоп. Вершин нет

Алгоритм Дейкстры

```
function ShortestPath_Dijkstra(G, src, d, prev)
    // Input: G = (V, E), src, dst
    // Output: d[1:n], prev[1:n]
    //   prev[i] - узел, предшествующий i в пути

    // Помещаем вершины в очередь с приоритетом
    for each i in V \ {src} do
        d[i] = Infinity
        prev[i] = -1
        PriorityQueueInsert(Q, i, d[i])
    end for

    d[src] = 0
    prev[src] = -1
    PriorityQueueInsert(Q, src, d[src])
```

Алгоритм Дейкстры

```
    for i = 0 to n - 1 do
        // Извлекаем узел ближайший к начальному
        v = PriorityQueueRemoveMin(Q)
        // Отмечаем v как посещенный
        H = H + {v}

        // Цикл по смежным вершинам узла v
        for each u in Adj(v) \ H do
            // Путь через u короче текущего пути?
            if d[v] + w(v, u) < d[u] then
                d[u] = d[v] + w(v, u)
                PriorityQueueDecrease(Q, u, d[u])
                prev[u] = v
            end if
        end for
    end for
end function
```

Алгоритм Дейкстры

Вопросы:

- *Сколько времени работает этот алгоритм?*
- *Что происходит когда изменяется стоимость линии или когда маршрутизатор/линия выходят из строя?*

Сложность алгоритма Дейкстры

Вариант реализации алгоритма Дейкстры	**Насыщенный граф** $m = O(n^2)$	**Разреженный граф** $m = O(n)$
Вариант 1 *D*[i] – это массив (поиск за время $O(n)$)	$T = O(n^2 + m) = \boldsymbol{O(n^2)}$	$T = O(n^2 + m) = \boldsymbol{O(n^2)}$
Вариант 2 *D*[i] хранятся в бинарной куче	$T = O(n \log n + m \log n) = \boldsymbol{O(n^2 \log n)}$	$T = O(n \log n + m \log n) = \boldsymbol{O(n \log n)}$
Вариант 3 *D*[i] хранятся в Фибоначчиевой куче	$T = O(m + n \log n) = \boldsymbol{O(n^2)}$	$T = O(n + n \log n) = \boldsymbol{O(n \log n)}$

Алгоритм Дейкстры на практике

- *Алгоритм Дейкстры – это пример алгоритма по состоянию канала*
  - *состояние линии знает каждый маршрутизатор*
  - *каждый маршрутизатор строит соединяющее дерево минимальной стоимости до каждого другого маршрутизатора*
- *Этот алгоритм является основой OSPF (Open Shortest Path First) - широко используемого протокола маршрутизации (том 2 стр.82-86)*

Постановки задач о кратчайшем пути

Задача о кратчайшем пути между парой вершин (single-pair shortest path problem)
Требуется найти кратчайший путь из заданной вершины *s* в заданную вершину *d*

Задача о кратчайших путях из заданной вершины во все (single-source shortest path problem)
Найти кратчайшие пути из заданной вершины *s* во все

Задача о кратчайшем пути в заданный пункт назначения (single-destination shortest path problem)
Требуется найти кратчайшие пути в заданную вершину *v* из всех вершин графа

Задача о кратчайшем пути между всеми парами вершин (all-pairs shortest path problem)
Требуется найти кратчайший путь из каждой вершины *u* в каждую вершину *v*

Алгоритмы поиска кратчайшего пути в графе

Алгоритм	Применение
Алгоритм Дейкстры	Находит кратчайший путь от одной из вершин графа до всех остальных. Алгоритм работает только для графов без ребер отрицательного веса ($w_{ij} \geq 0$)
Алгоритм Беллмана-Форда	Находит кратчайшие пути от одной вершины графа до всех остальных во взвешенном графе. Вес ребер может быть отрицательным
Алгоритм поиска A* (A star)	Находит путь с наименьшей стоимостью от одной вершины к другой, используя алгоритм поиска по первому наилучшему совпадению на графе
Алгоритм Флойда-Уоршелла	Находит кратчайшие пути между всеми вершинами взвешенного ориентированного графа
Алгоритм Джонсона	Находит кратчайшие пути между всеми парами вершин взвешенного ориентированного графа (должны отсутствовать циклы с отрицательным весом)
Алгоритм Ли (волновой алгоритм)	Находит путь между вершинами *s* и *t* графа, содержащий минимальное количество промежуточных вершин (трассировки электрических соединений на кристаллах микросхем и на печатных платах)
Алгоритмы Viterbi, Cherkassky, ...	

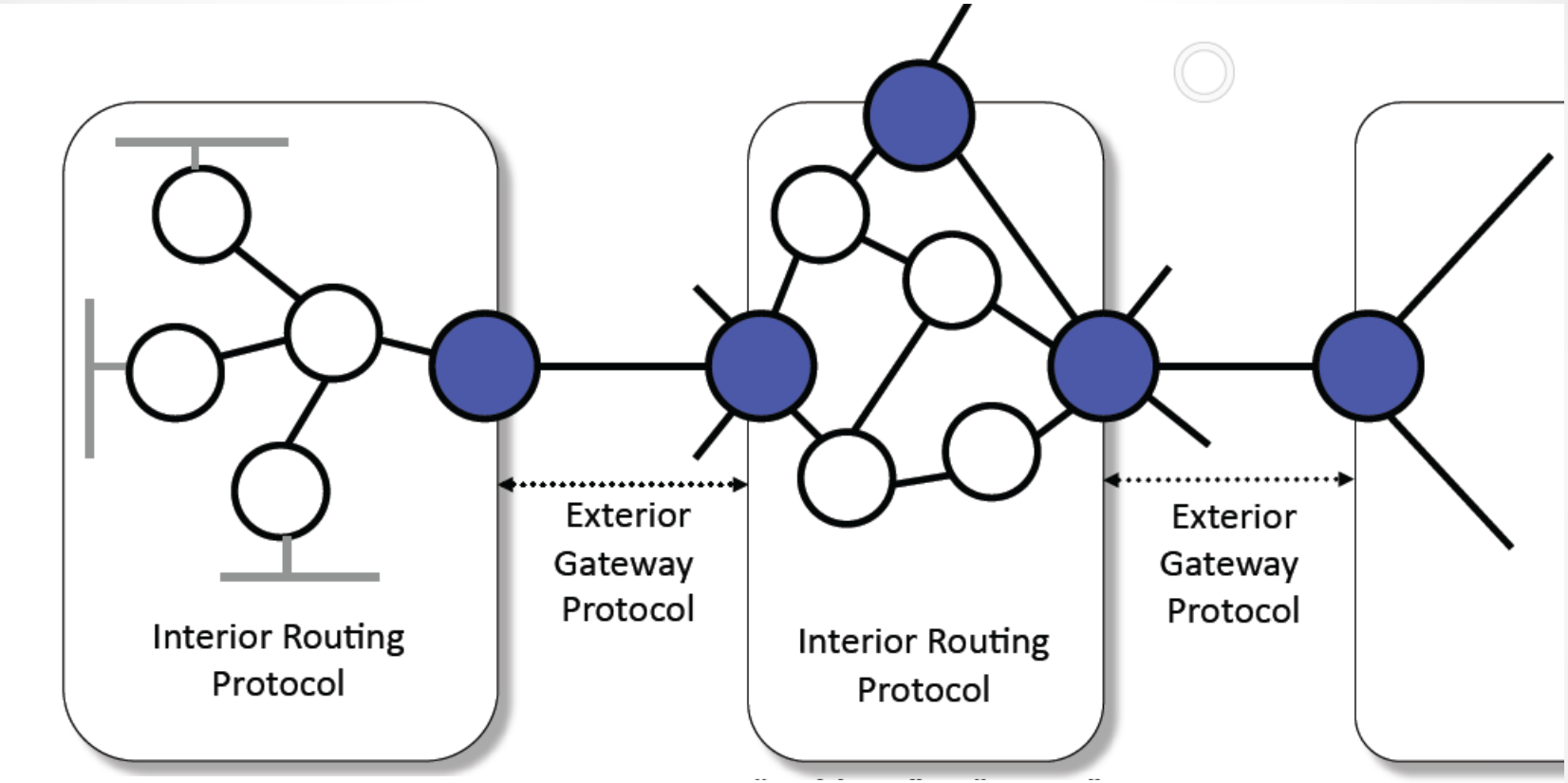
Маршрутизация в Интернет

(том 2 стр.82-88)

Введение в компьютерные сети

проф. Смелянский Р.Л.
Лаборатория Вычислительных комплексов
ф-т ВМК МГУ

Иерархическая структура Интернет



АС с одним выходом или Stub

Транзитная АС

Автономные Системы

Единица иерархии в Интернет

- *Внутри АС ее владелец решает как маршрутизировать потоки данных*
- *Между АС должен использоваться протокол BGP-4 (Border Gateway Protocol v4 RFC 1771)*

Как найти номер АС?

Протоколы внутренней маршрутизации

RIP (RFC 2453)
(www.rfc.com.ru, http://www.ietf.org/rfc.html)

- используют алгоритм по вектору расстояния (алгоритм Б-Ф)
- обновление векторов каждые 30 секунд
- аутентификация при обновлениях не применяется
- изначально был использован в BSD Unix
- сегодня применяется редко

OSPF (RFC 2328)

- изменения состояний линии рассылаются лавиной по необходимости
- каждый маршрутизатор использует алгоритм Дейкстры
- изменения аутентифицируются
- АС можно разбивать на области
- Широко используется, сложный аналог

IS-IS (RFC 1142), который также широко используется

Маршрутизация через одну точку выхода

В АС выделяют одну точку выхода, так что маршрутизаторы внутри АС могут использовать маршрутизацию по умолчанию

- *Каждый маршрутизатор знает все префиксы внутри АС*
- *Пакеты для других АС пересылаются на маршрутизатор-выход по умолчанию*
- *Маршрутизатор-выход по умолчанию – пограничный шлюз для других АС*

Таблицы маршрутизации в АС с одним выходом (маршрутизатор-выход) по умолчанию, как правило, имеют не большой размер

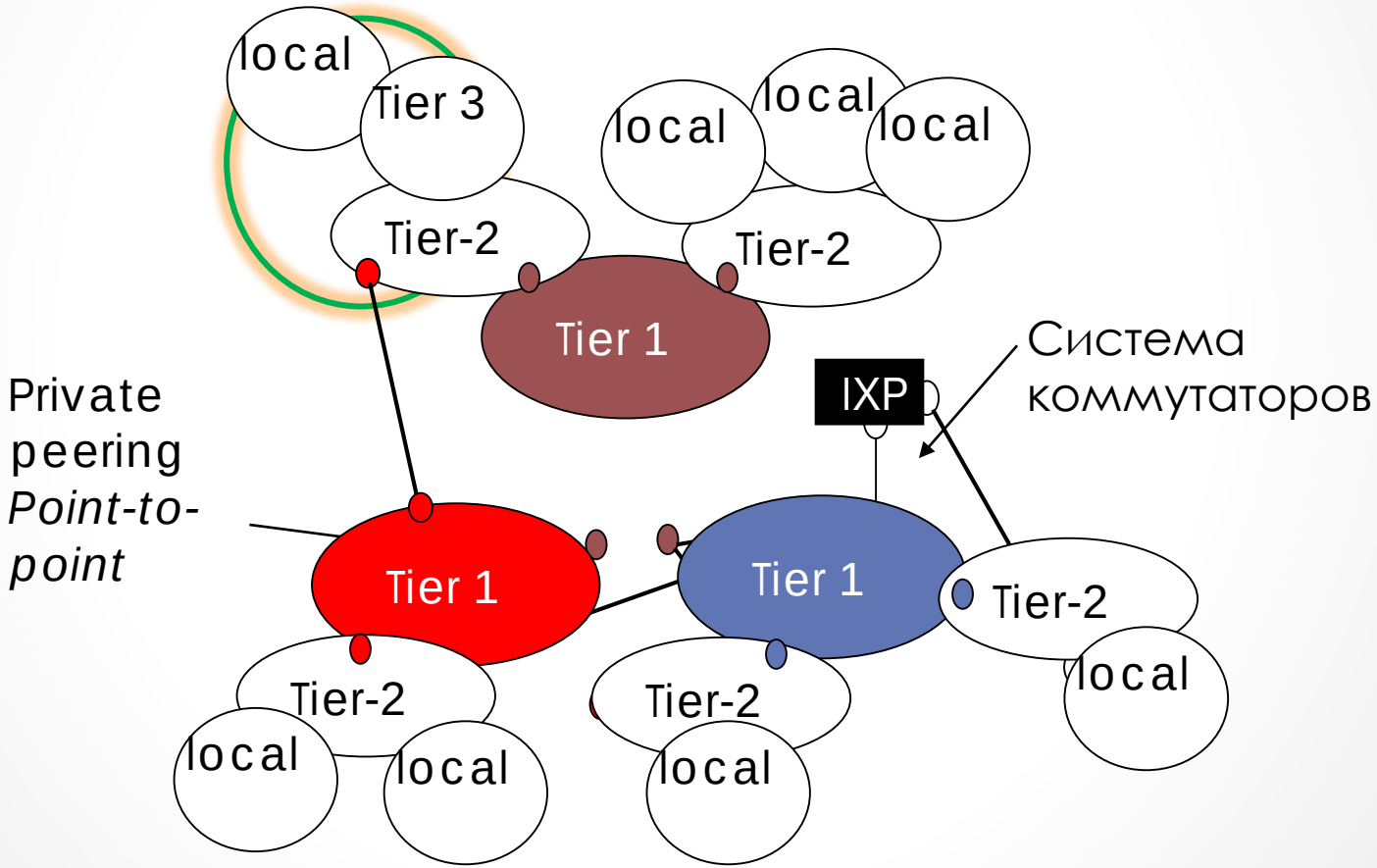
Маршрутизация через несколько точек выхода

- *Используется в транзитных АС и сетях международных компаний с разветвленной сетью офисов*
- *Каждому внутреннему маршрутизатору должно быть сообщено какую точку выхода он должен использовать для определенного префикса точки назначения*
- *Таблица маршрутизации существенно разрастается*
- *Два подхода:*
  - *«горячая картошка» – переслать ближайшему выходу*
  - *выбрать выход ближе всего к токе назначения*

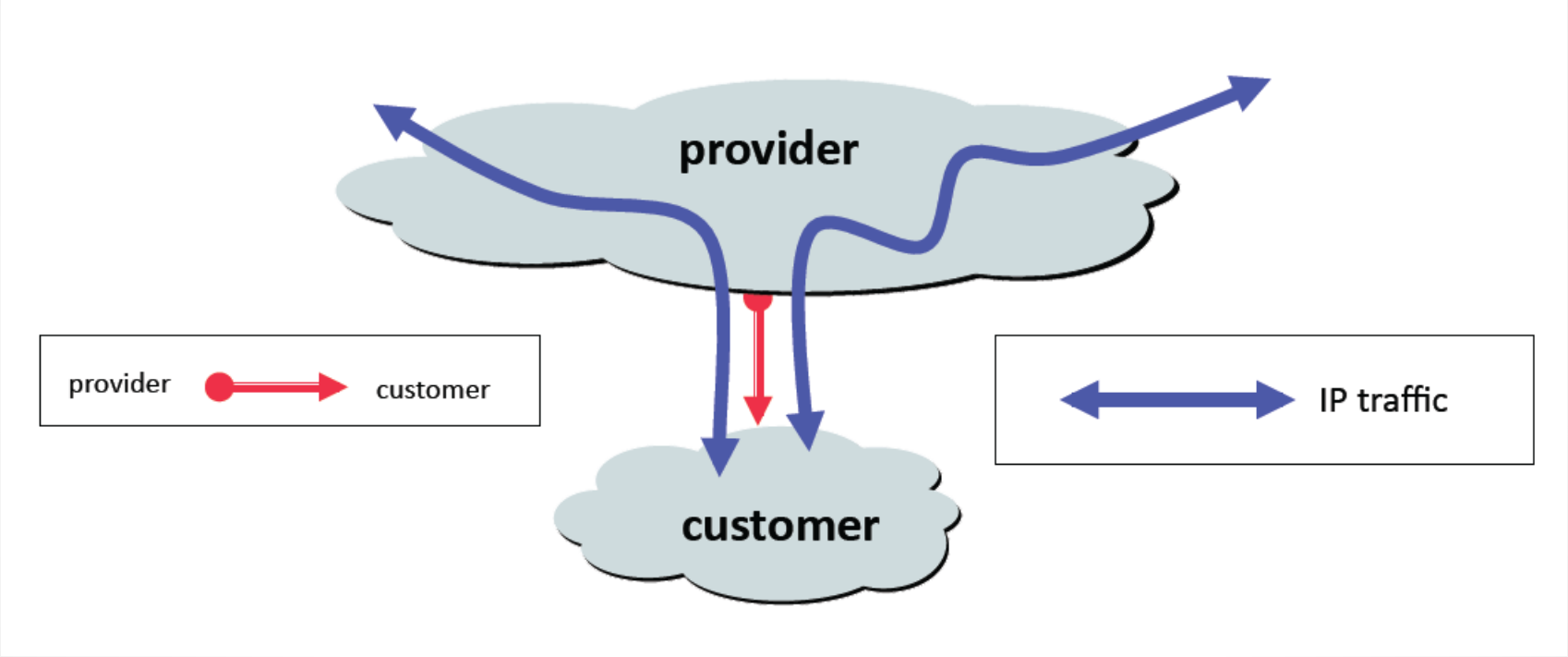
Протокол внешней маршрутизации

- *Все АС взаимодействуют, используя протокол BGP-4*
- *BGP-4 был разработан чтобы решить следующие проблемы:*
  - *Топология: Интернет плохо структурированная смесь разнообразных АС*
  - *Автономия АС: каждая АС по-своему определяет стоимость линии, поэтому невозможно построить путь с наименьшей стоимостью*
  - *Доверие: некоторые АС не могут доверять тем маршрутам, которые предлагают другие АС (два конкурирующих провайдера, защита конфиденциальности через территорию неприятеля)*
  - *Политика: разные АС преследуют разные цели (мин. число скачков vs предпочтение одного провайдера перед другими)*

Структура Интернет

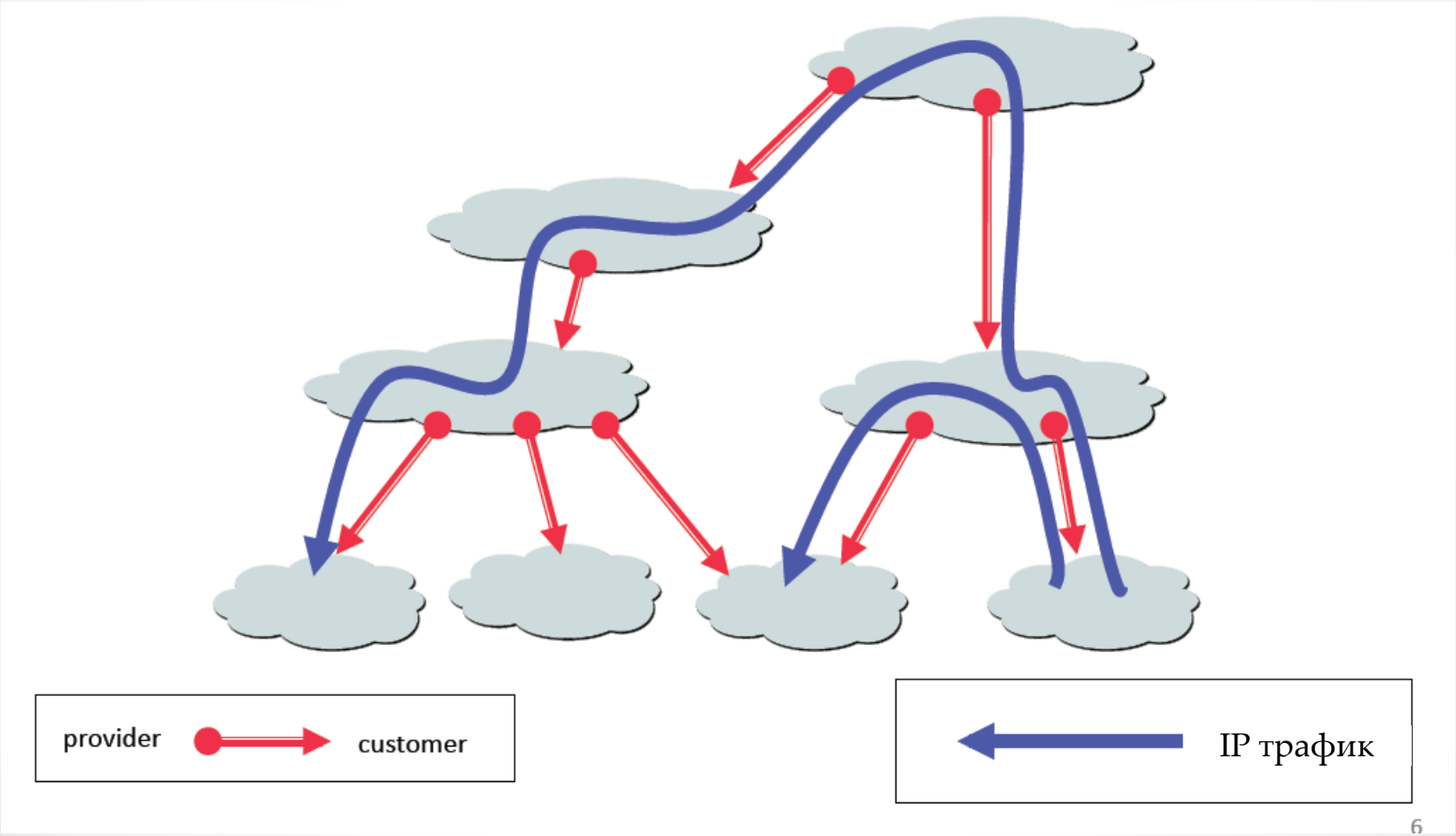


Заказчики и провайдеры

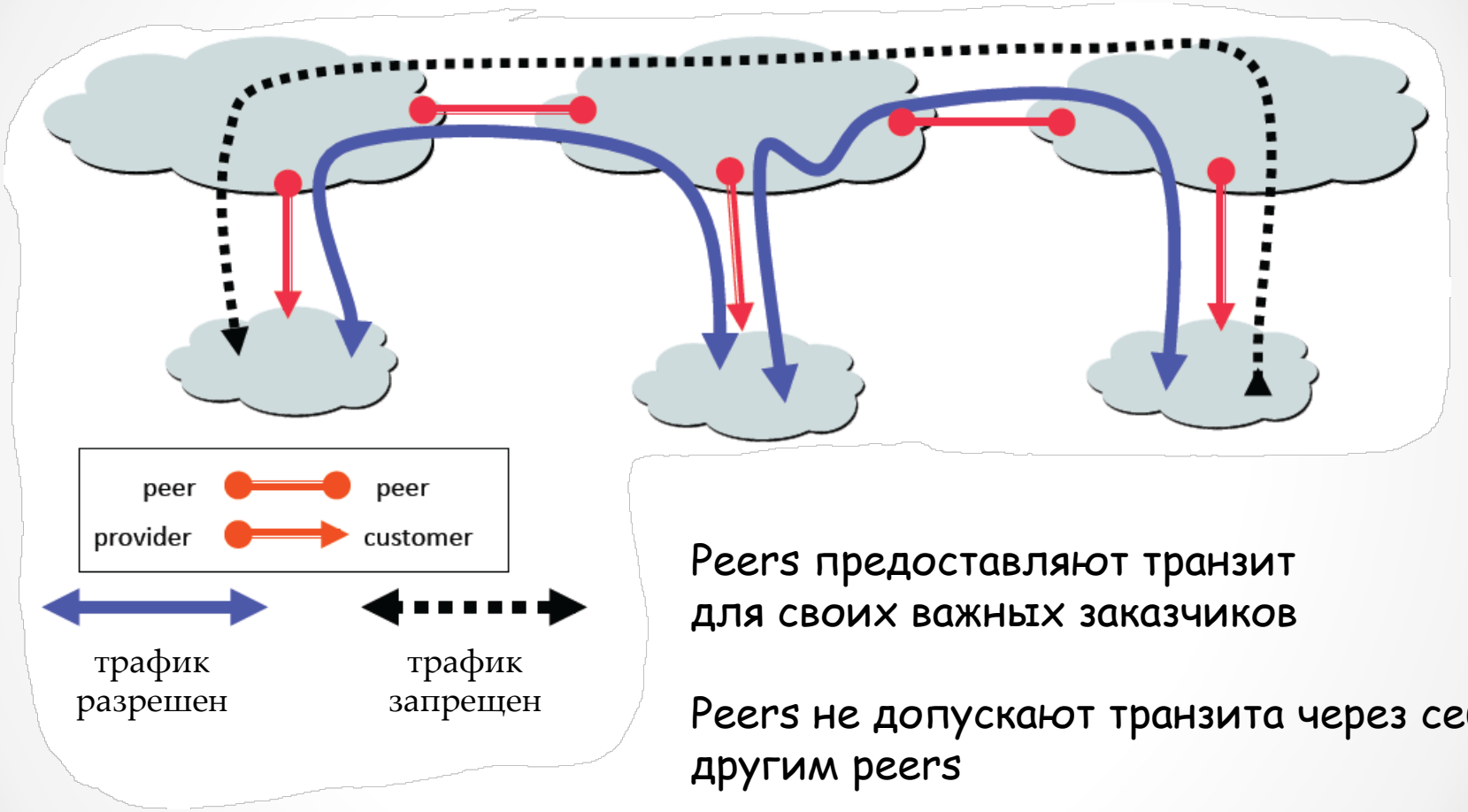


Заказчики платят провайдеру за свои пакеты

Иерархия заказчиков и провайдеров



Отношение Peering



Peers предоставляют транзит для своих важных заказчиков

Peers не допускают транзита через себя другим peers

Peers не ведут, как правило, взаиморасчетов

Итог

- *Интернет состоит из множества независимо управляемых АС*
- *Каждая АС использует свой внутренний протокол маршрутизации*
- *Оконечные АС используют простую маршрутизацию по умолчанию*
- *Транзитные АС должны сами определять какой выход использовать*
- *Для взаимодействия АС должны использовать BGP-4 протокол*

Маршрутизация в BGP

Введение в компьютерные сети

проф. Смелянский Р.Л.
Лаборатория Вычислительных комплексов
ф-т ВМК МГУ

Основы
Border Gateway Protocol (BGP-4)

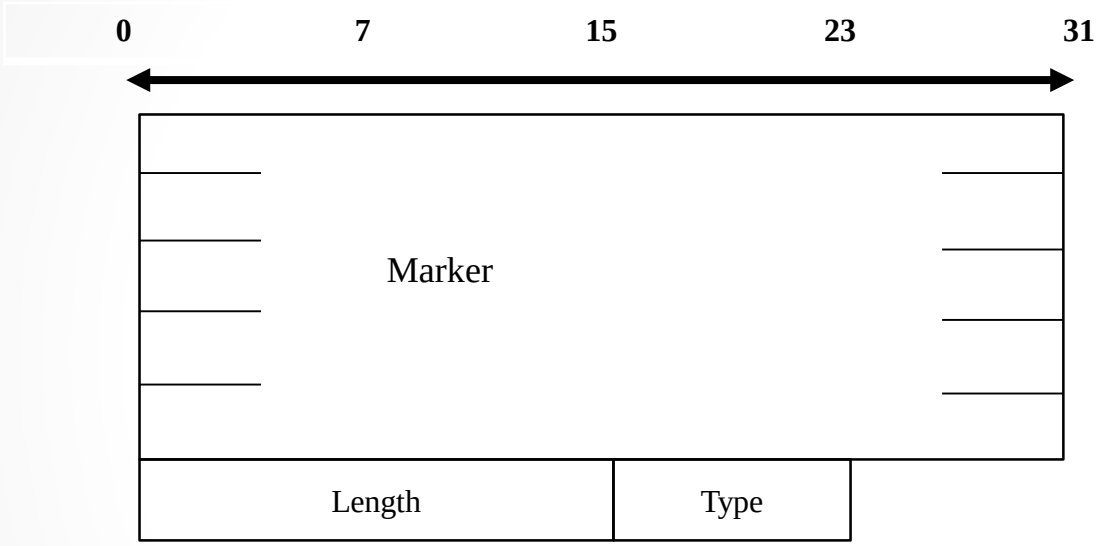
- BGP использует «вектор пути»
- Каждый BGP маршрутизатор рассылает список путей (путь – список AC)
  - AS_PATH
  - К сети 171.64/16 можно пройти по пути {AS7,AS52,AS13}
- Наличие цикла в маршруте определяется локально и такие маршруты игнорируются
- Из множества доступных маршрутов выбирается тот, которые наиболее всего соответствует политике AC
- Если маршрутизатор/линии вышли из строя, то маршрут изымается из списка

BGP сообщения

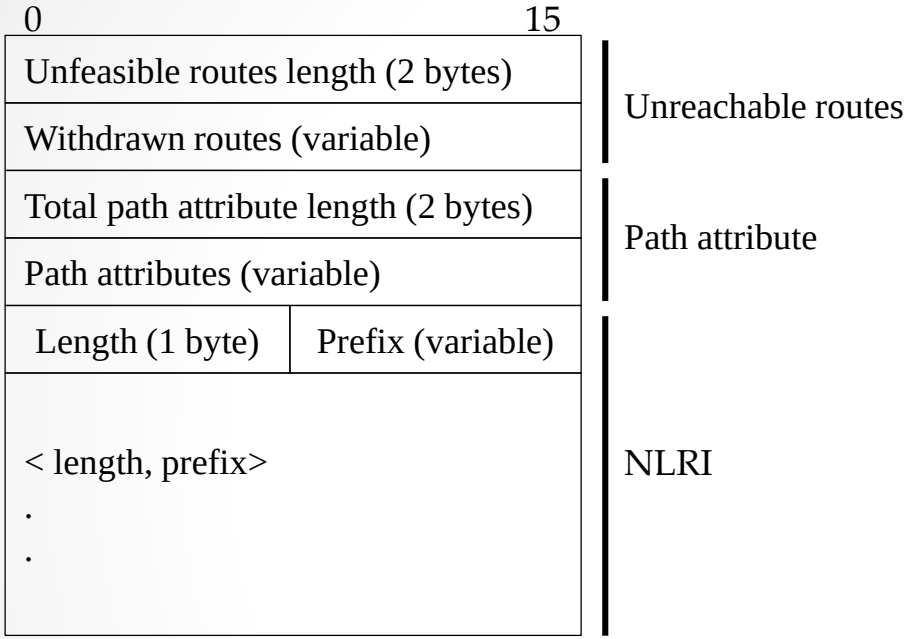
- ***Open*** — Установка BGP сессии
- ***Keep Alive*** — Проверка работоспособности через регулярные интервалы
- ***Notification*** — Закрытие peering сессии
- ***Update*** — Объявление нового или изъятие ранее объявленного маршрута
- ***BGP объявление = префикс + атрибуты маршрута***

- ***Path attributes***
  - следующий скачок (hop), список AC (path), предпочтения, правило определения выхода ….

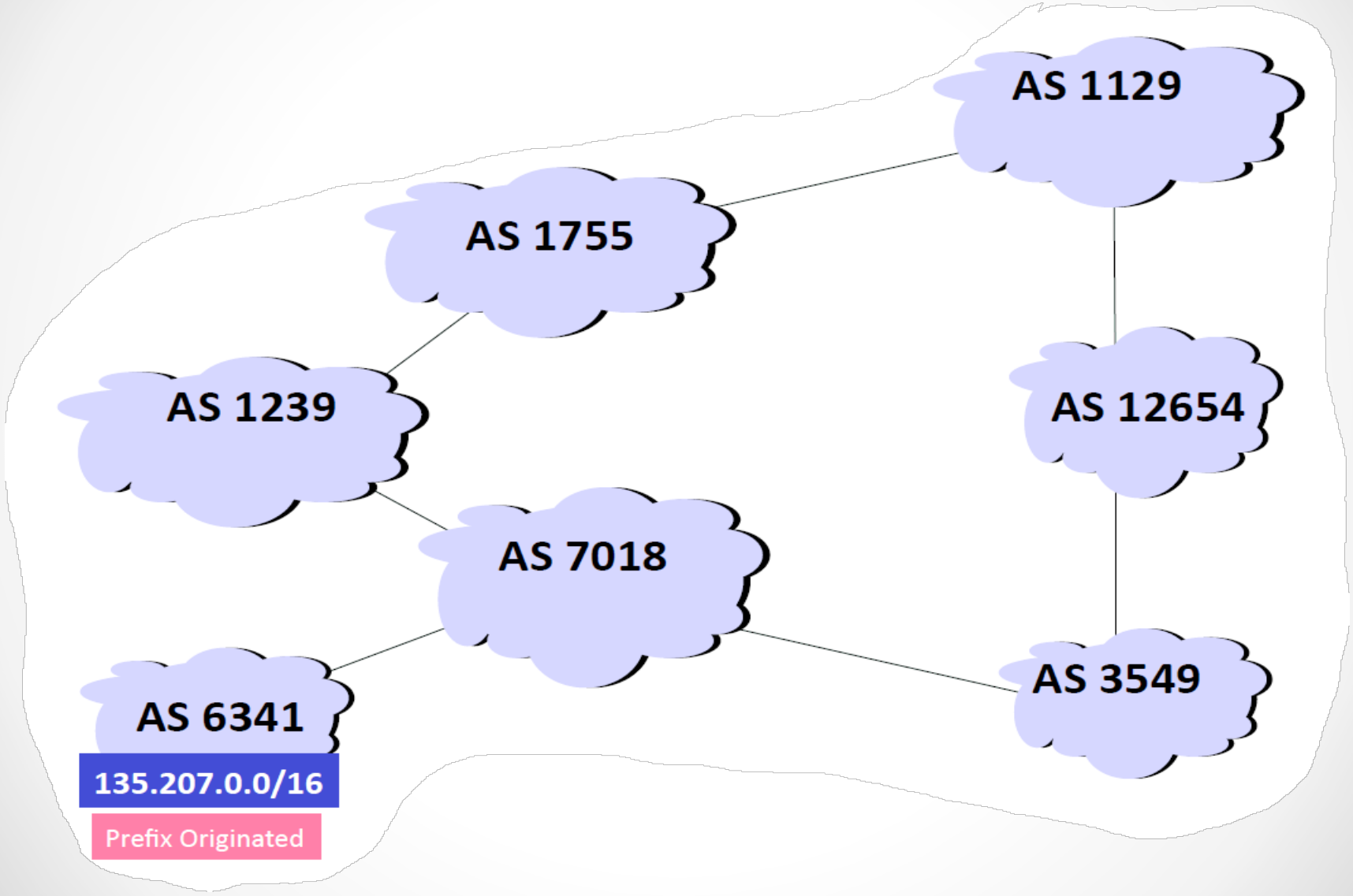
Формат заголовка BGP сообщения



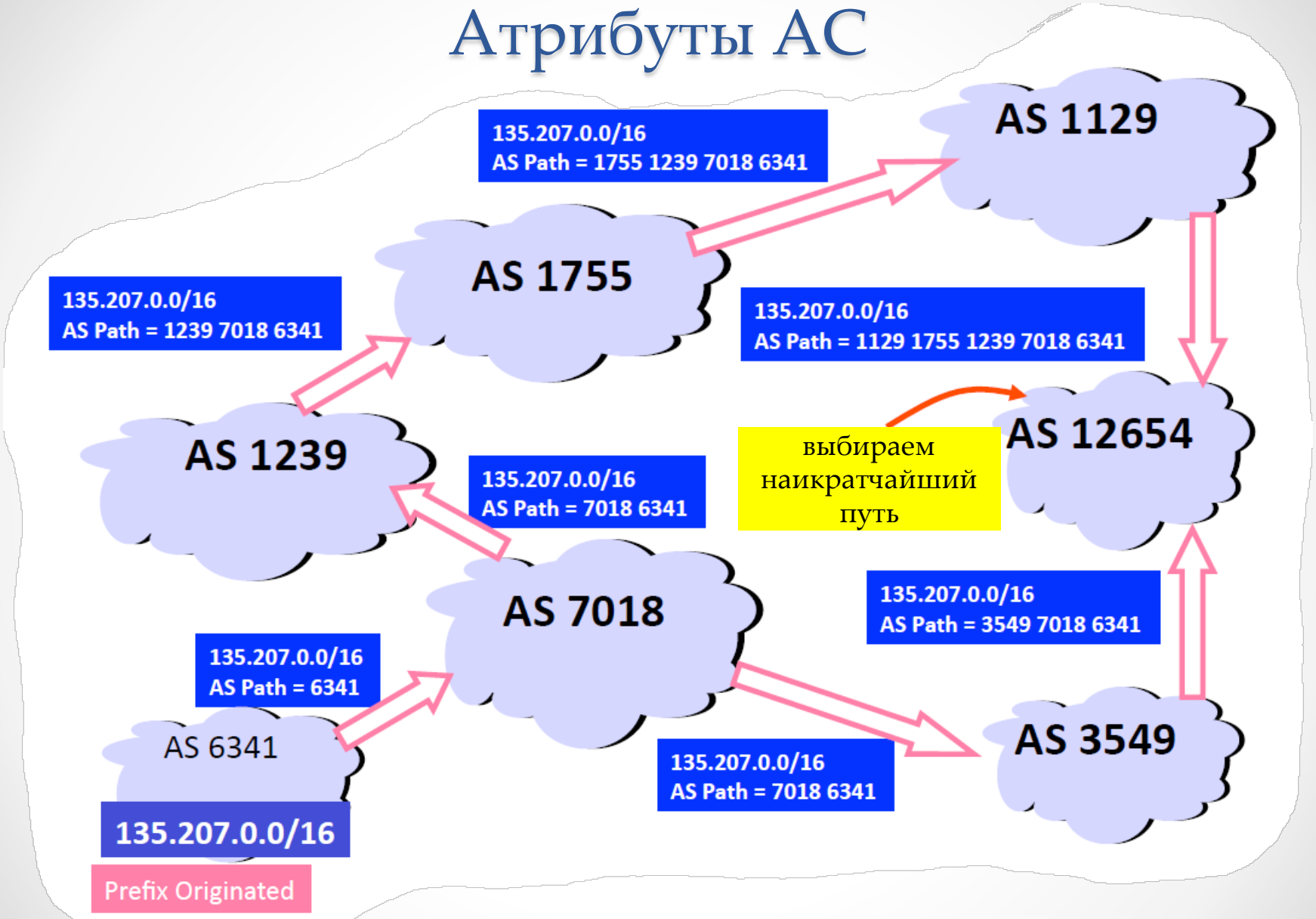
Формат BGP Update сообщения

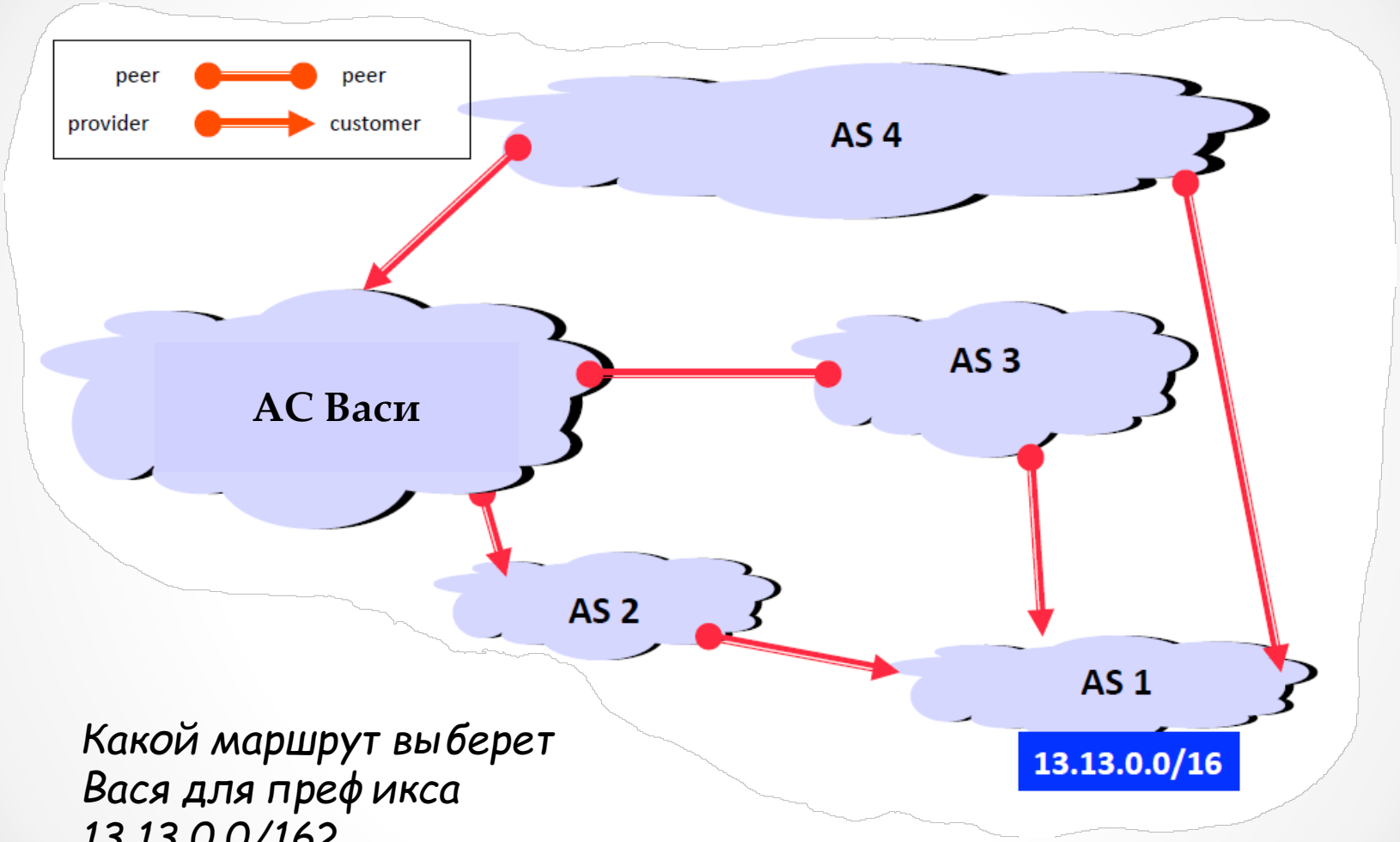


Атрибуты АС

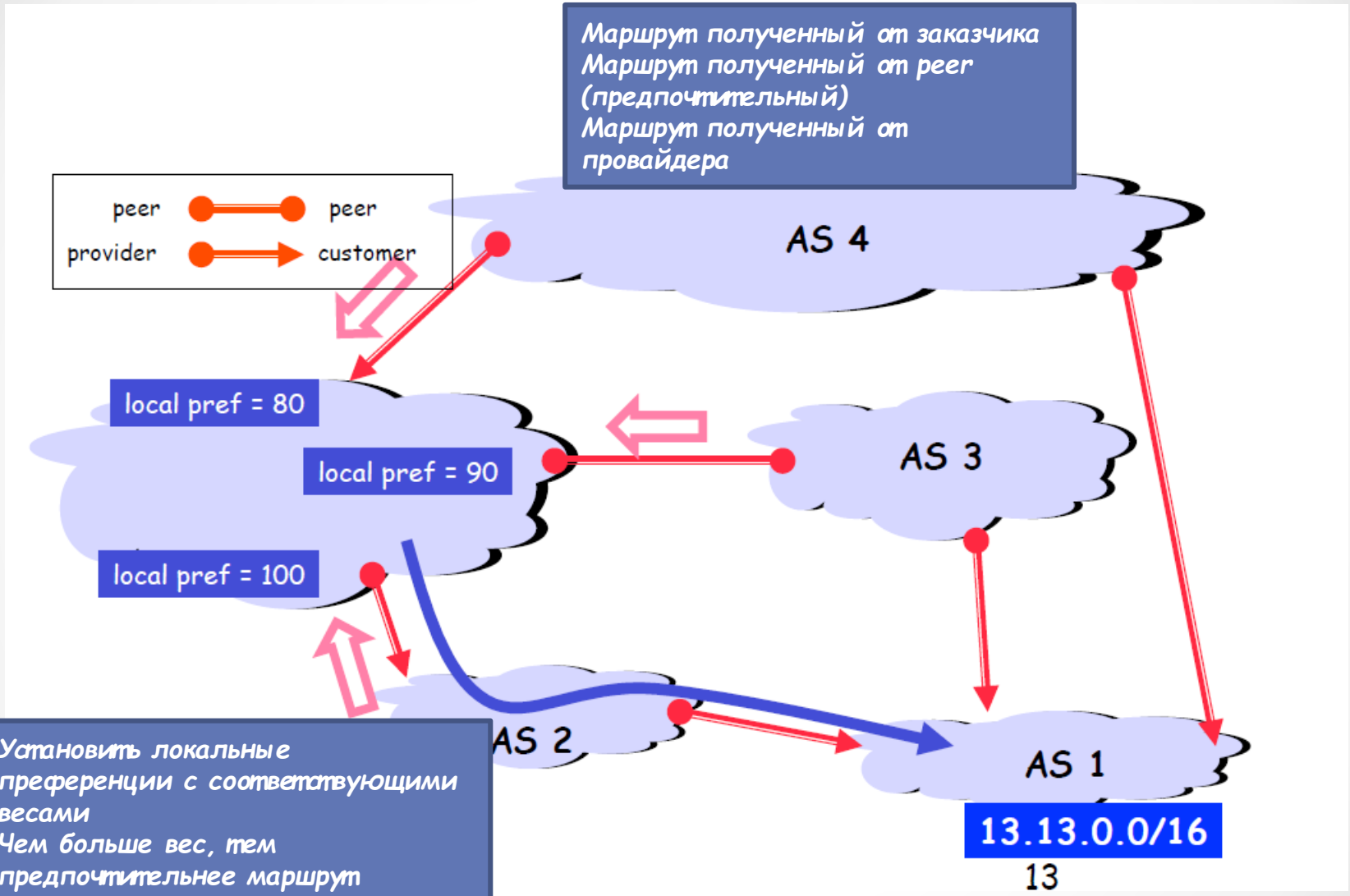

AS 1129
AS 1755
AS 1239
AS 12654
AS 7018
AS 6341
AS 3549
135.207.0.0/16
Prefix Originated

Атрибуты АС

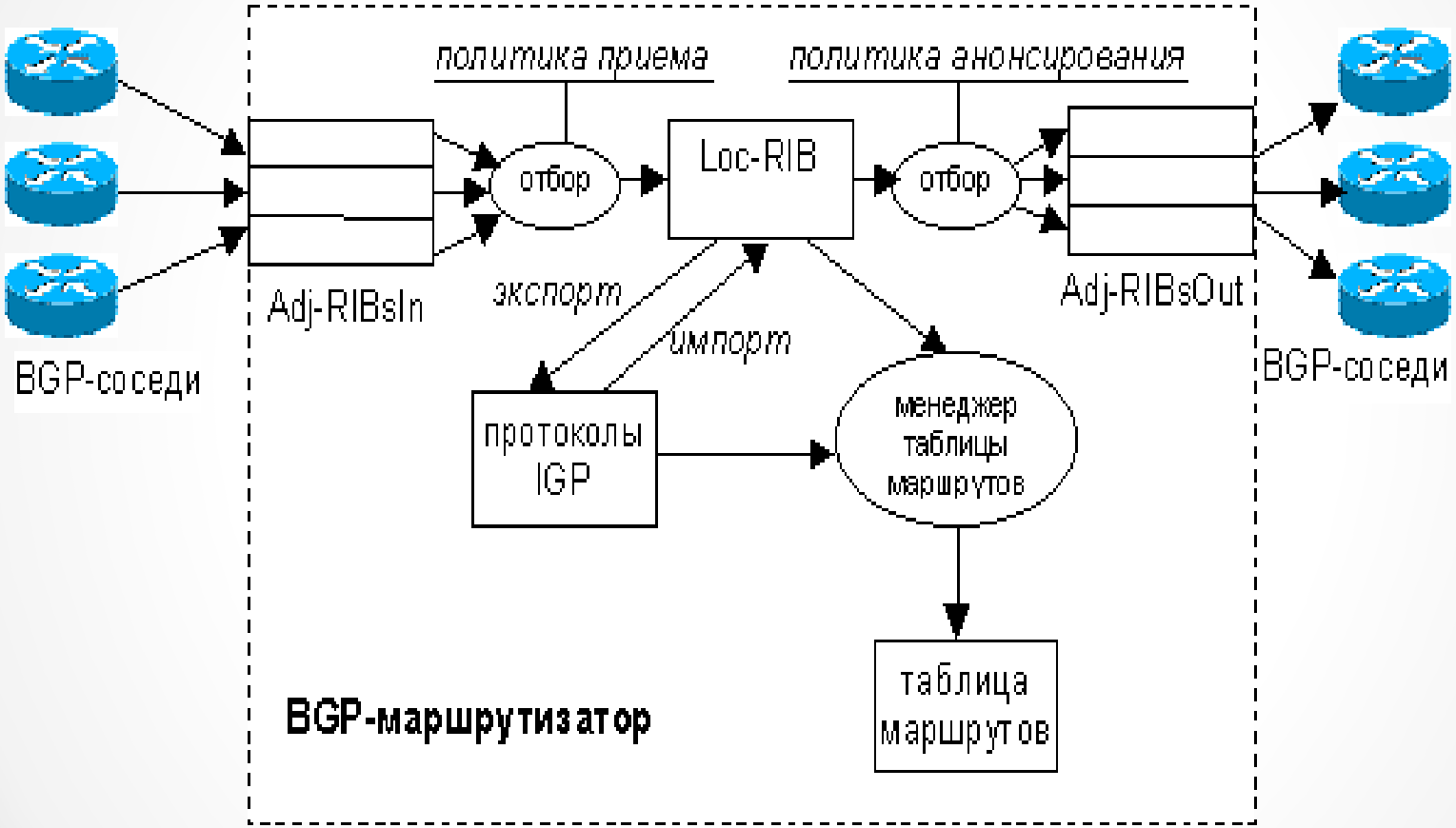

AS 1129
135.207.0.0/16
AS Path = 1755 1239 7018 6341
AS 1755
135.207.0.0/16
AS Path = 1239 7018 6341
135.207.0.0/16
AS Path = 1129 1755 1239 7018 6341
AS 1239
AS 12654
выбираем наикратчайший путь
135.207.0.0/16
AS Path = 7018 6341
AS 7018
135.207.0.0/16
AS Path = 3549 7018 6341
135.207.0.0/16
AS Path = 6341
AS 6341
AS 3549
135.207.0.0/16
AS Path = 7018 6341
135.207.0.0/16
Prefix Originated



Какой маршрут выберет Вася для префикса 13.13.0.0/16?


Маршрут полученный от заказчика
Маршрут полученный от peer (предпочтительный)
Маршрут полученный от провайдера
peer
peer
provider
customer
AS 4
local pref = 80
local pref = 90
local pref = 100
AS 3
AS 2
AS 1
13.13.0.0/16
13
Установить локальные преференции с соответствующими весами
Чем больше вес, тем предпочтительнее маршрут

Процедура выбора маршрута



Итог

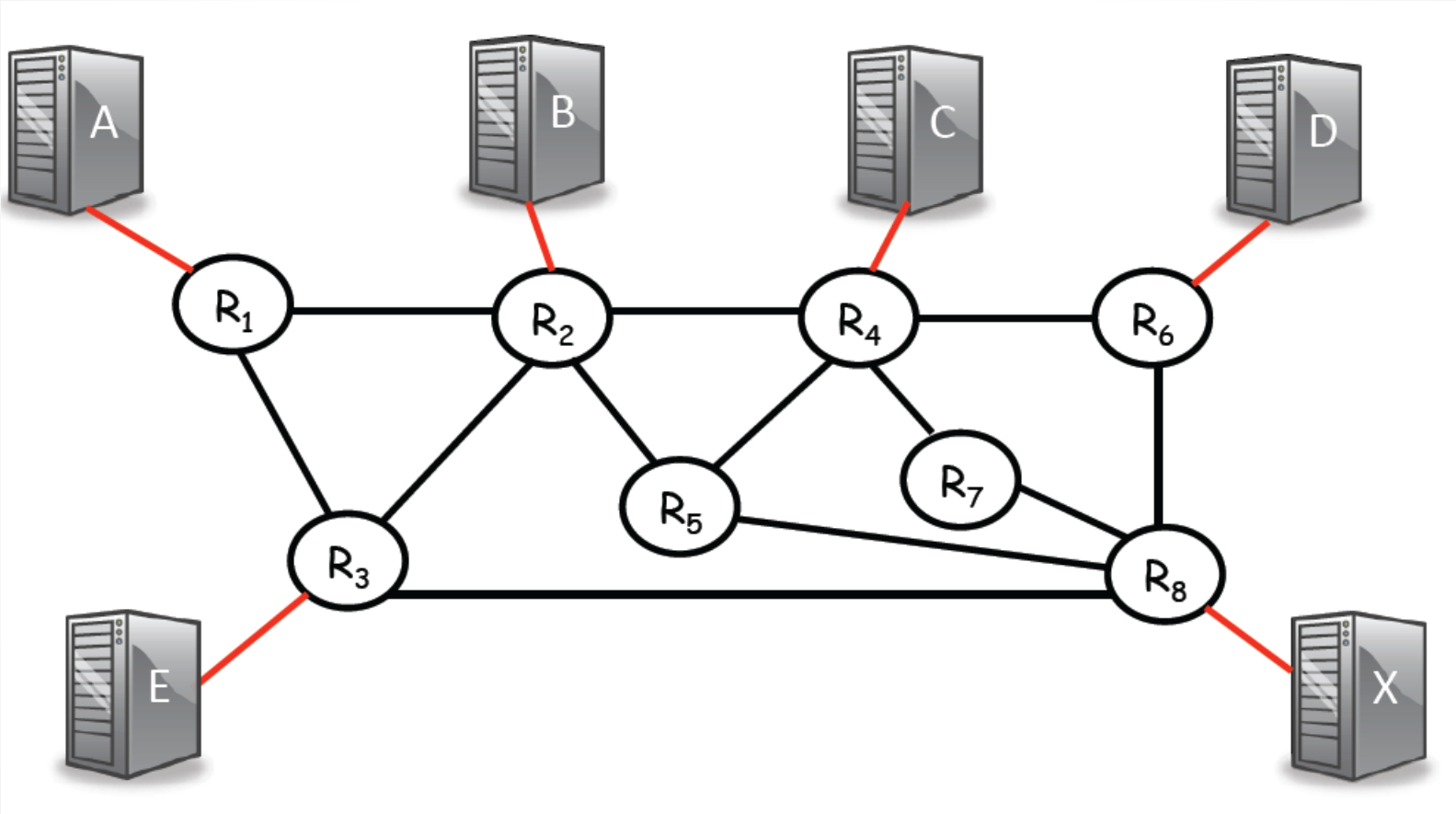
- *Все АС для взаимодействия в Интернете должны использовать BGP-4*
- *BGP-4 использует алгоритм маршрутизации по вектору пути, которые легко распознает циклы*
- *BGP-4 имеет сложный интерфейс, позволяющий каждой АС устанавливать свою локальную политику маршрутизации*
- *Каждая АС устанавливает свою политику для построения маршрутов, безопасности и локальных особенностей*

Групповая маршрутизация

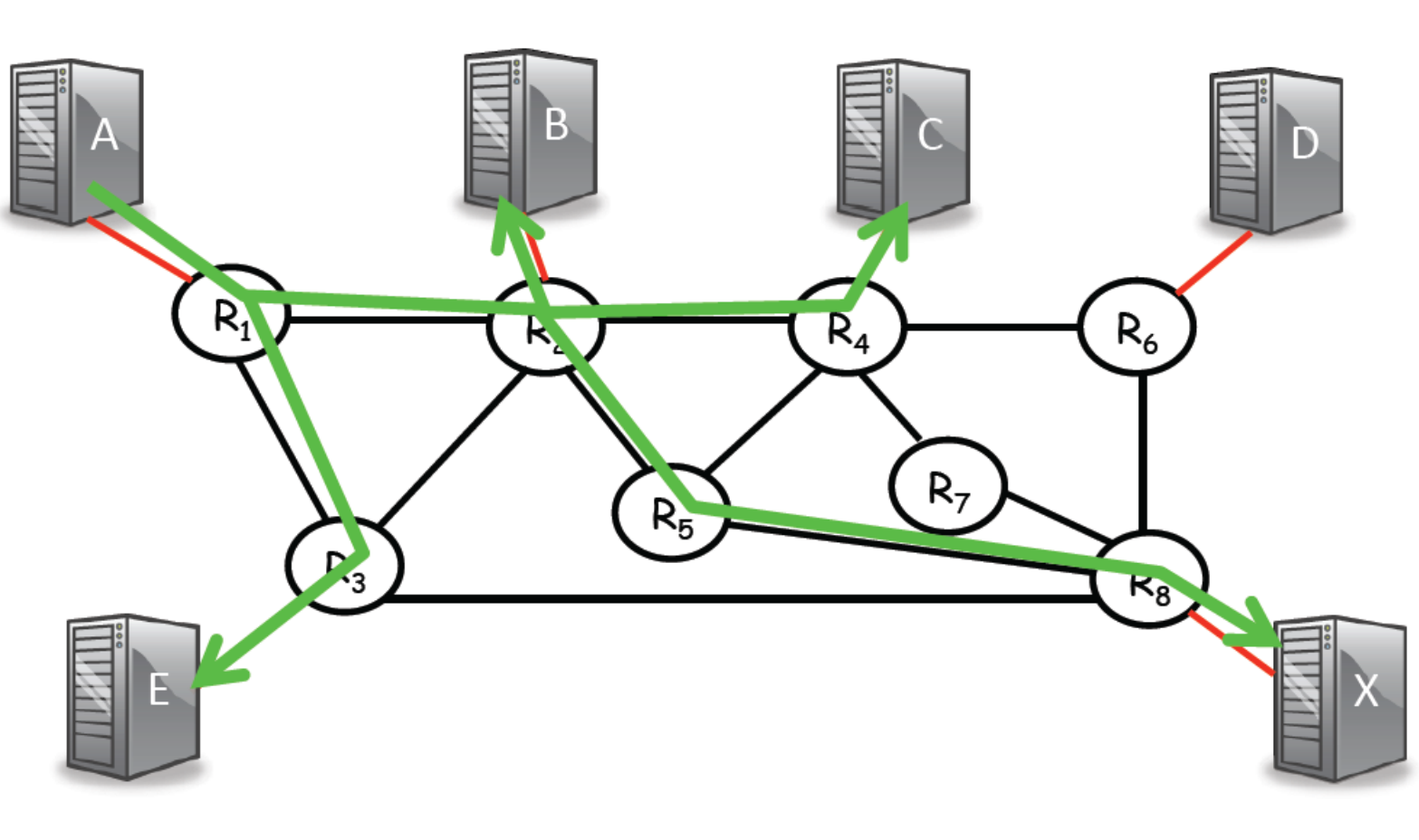
Введение в компьютерные сети

проф. Смелянский Р.Л.
Лаборатория Вычислительных комплексов
ф-т ВМК МГУ

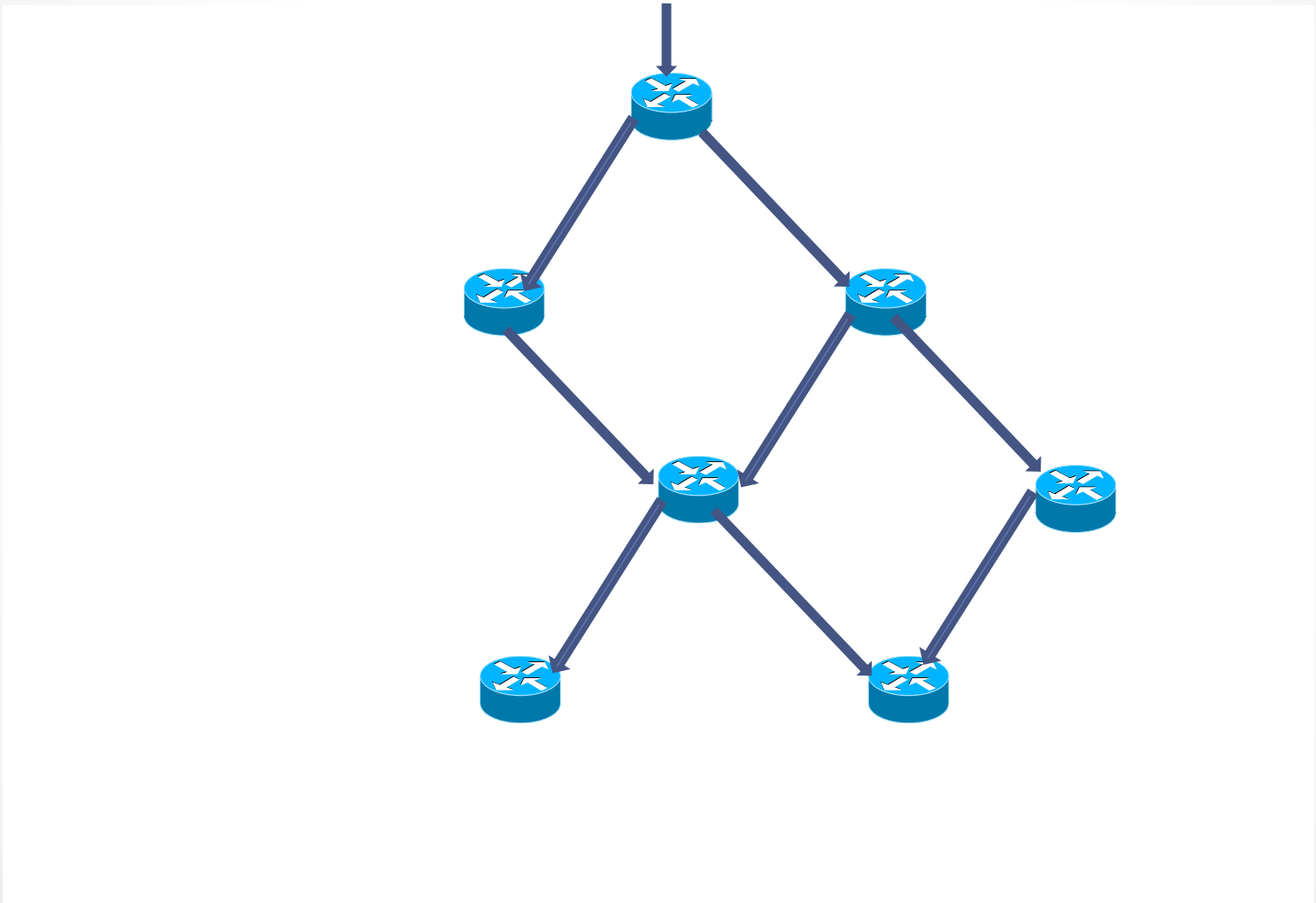
Групповая маршрутизация



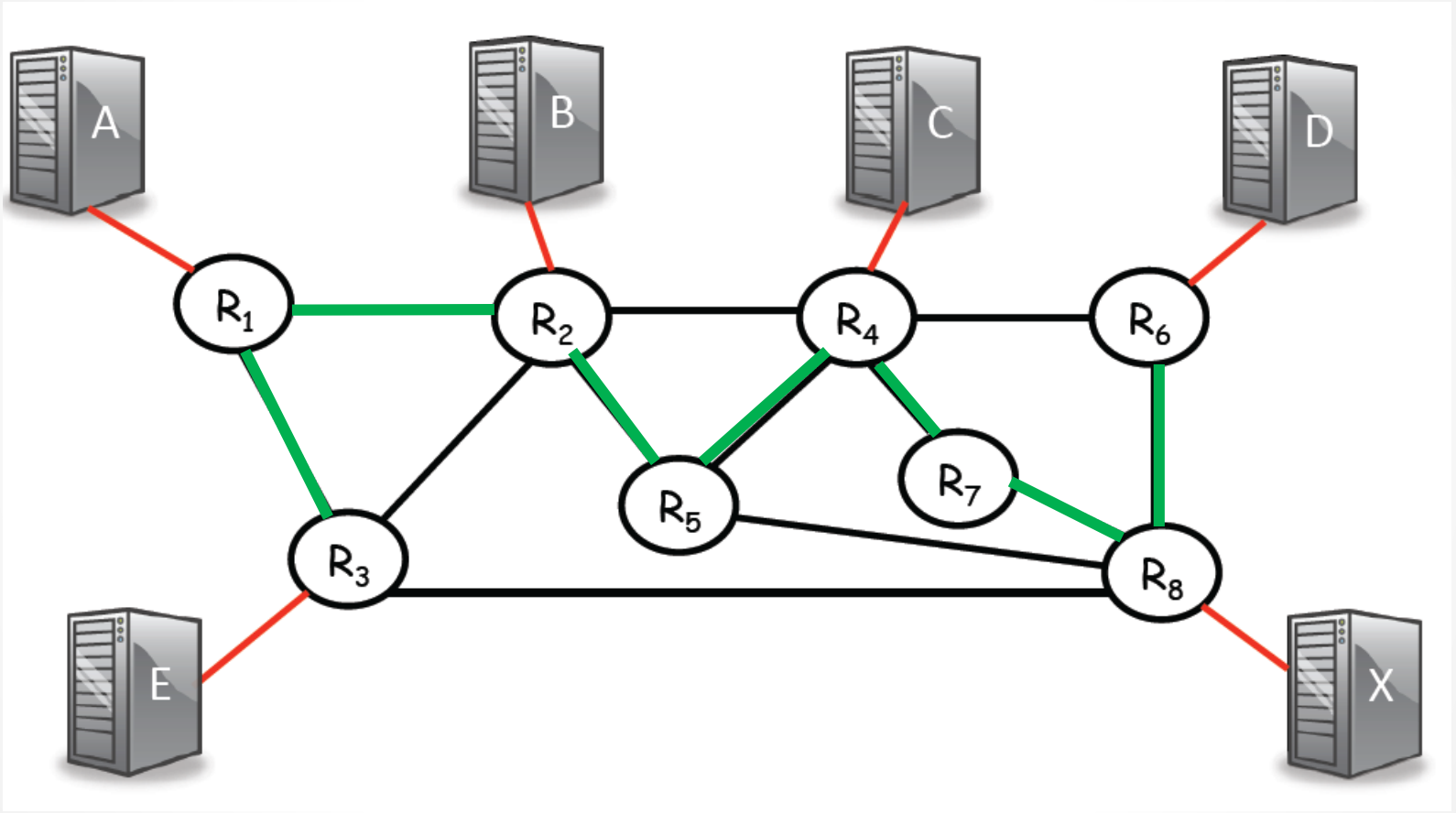
Групповая маршрутизация



Лавиной (Flooding)



Вещание по обратному пути (RPB)

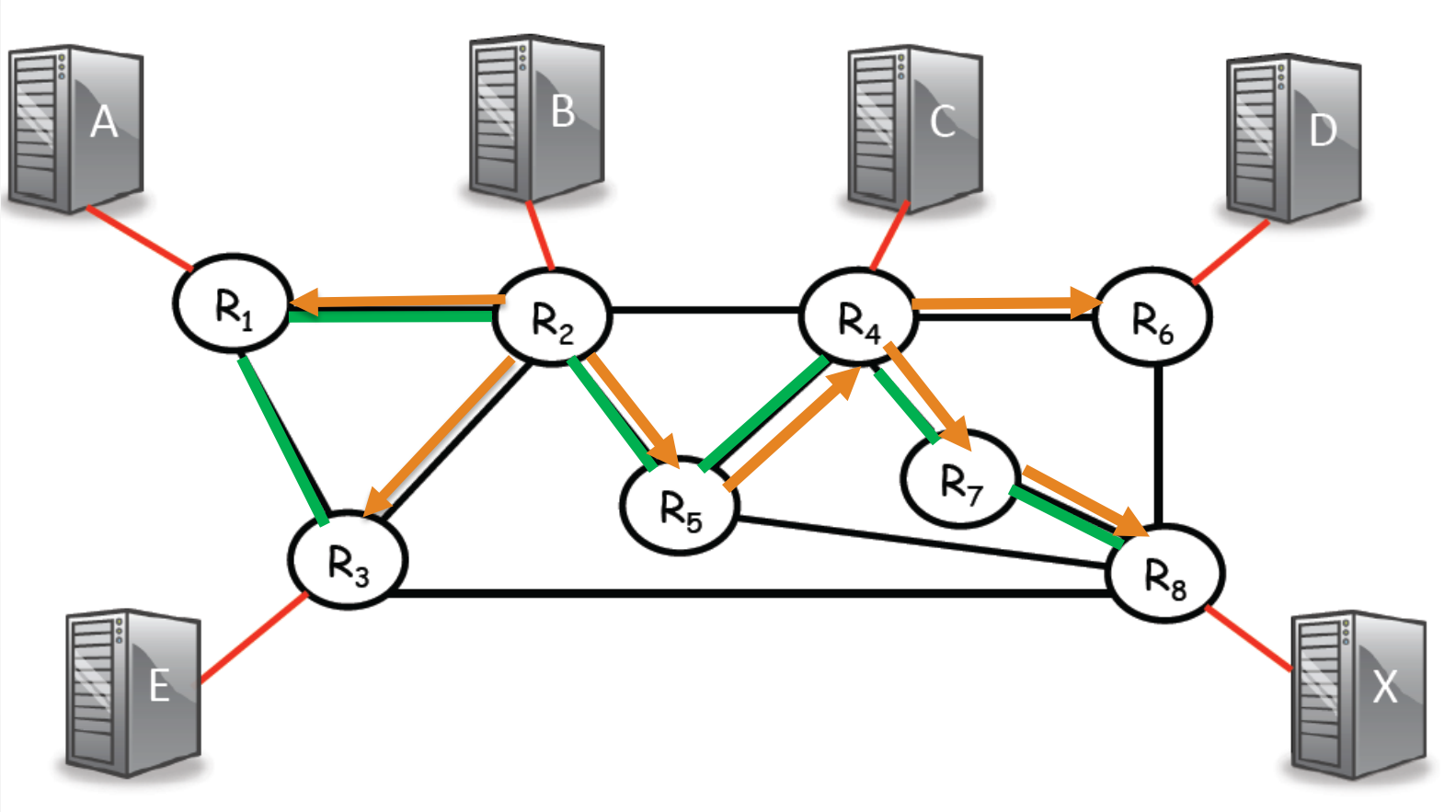


aka Reverse Path Forwarding (RPB)

RPB + обрезка (pruning)

1. *Каждому хосту пакеты доставляют без циклов*
2. *Маршрутизаторы через которые нет путей к нужным хостам, шлют сообщения обрезки*
3. *Результирующее дерево – дерево соединений минимальной стоимости от источника к группе интересующих хостов*

Одно дерево или несколько ?



Групповая маршрутизация на практике

- Методы и принципы
  - Вещание по обратному пути и обрезка
  - одно дерево vs несколько деревьев
- Протоколы
  - Групповая адресация
  - IGMP – управление группой
  - DVMRP – первый протокол групповой маршрутизации
  - PIM – протокол маршрутизации для независимых групп

Адресация и подключение к группе

- *IPv4: сети класса D специально выделены для групповой адресации*
- *IGMP (Internet Group Management Protocol RFC3376)*
  - *Этот протокол действует между хостом и непосредственно подсоединенным маршрутизатором*
  - *Хосты подписываются/запрашивают получать пакеты определенной группы*
  - *Маршрутизаторы периодически опрашивают хосты к каким группам они хотели бы быть подключенными*
  - *Если отклика нет, то членство в группе прекращается по time_out (soft-state)*

Групповая маршрутизация в Интернет

- *DVMRP*
  - *Distance Vector Multicast Routing Protocol (RFC 1075)*
  - *Первый протокол групповой маршрутизации в Интернет*
  - *Использует RPB + обрезка*
- *PIM*
  - *Протокол независимой групповой маршрутизации*
  - *Два режима: dense и sparse*
  - *Dense (RFC 3973) – аналогичен DVMRP*
  - *Sparse (RFC 4601) – через точки rendezvous, через которые пакеты достигают небольшого количества деревьев соединений*

Групповая маршрутизация на практике

- *Групповая маршрутизация на практике используется реже, чем ожидалось*
  - *по большей части коммуникации индивидуализированы*
  - *ранние реализации были не эффективны*
  - *сегодня в основном используются для IP TV и быстрой рассылки*
  - *используется отдельными приложениями*

Интересные вопросы:

Как сделать групповое взаимодействие надежным?
Как реализовать управление потоком?
Как поддерживать разную скорость работы с разными клиентами?
Как обеспечить конфиденциальность при групповом взаимодействии?

Маршрутизация по соединяющему дереву

Введение в компьютерные сети

проф. Смелянский Р.Л.
Лаборатория Вычислительных комплексов
ф-т ВМК МГУ

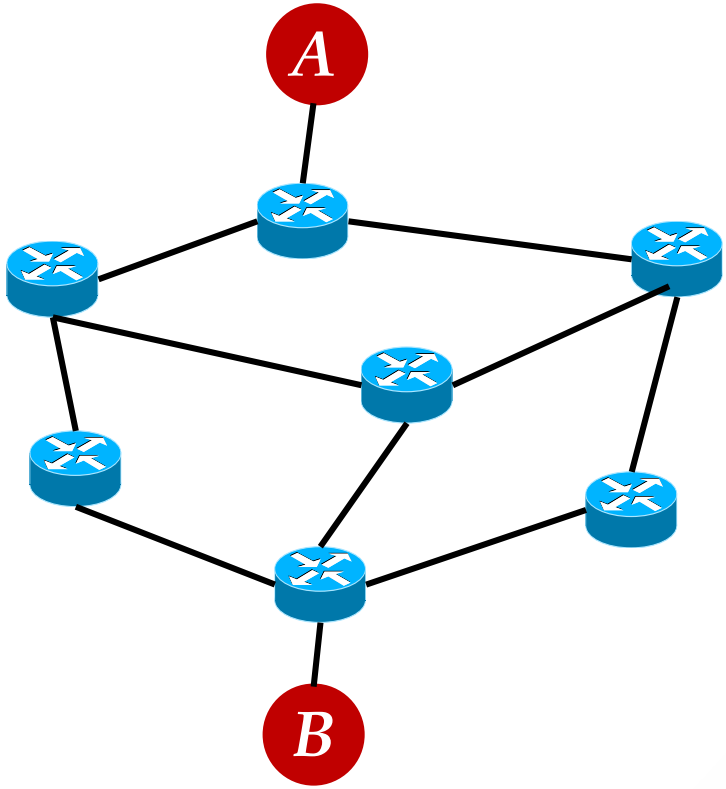
План

- *Ethernet коммутаторы «маршрутизируют» пакеты*
- *Как коммутатор находит неизвестные ему адреса, как он защищается от циклов?*
- *Коммутатор используют единое соединяющее дерево, вдоль которого передаются пакеты*

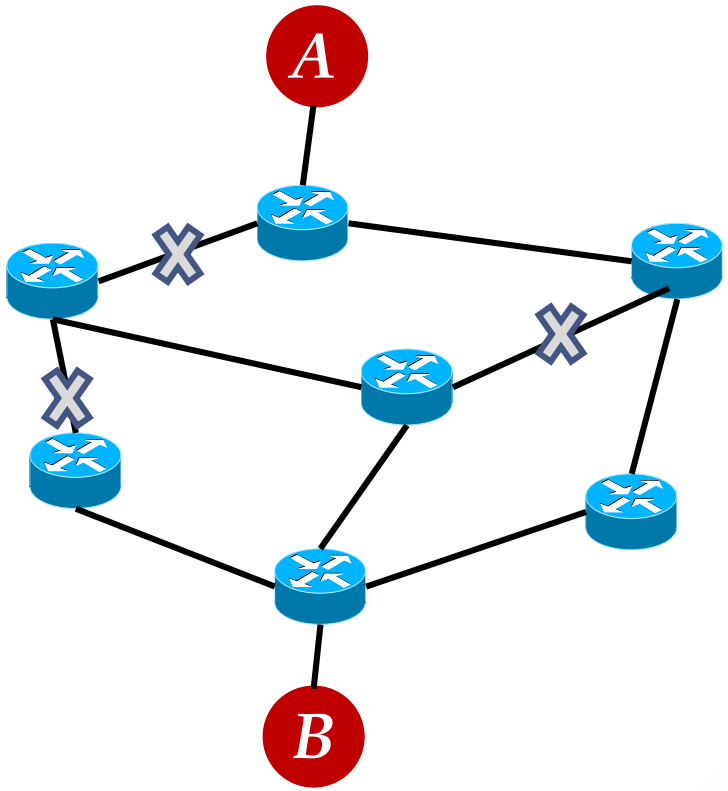
Ethernet коммутатор

1. *Анализирует заголовок каждого поступающего кадра*
2. *Если DA есть в таблице коммутации, передать кадр на надлежащий порт-выход*
3. *Если DA нет в таблице коммутации, разослать кадр по всем портам за исключением того, по которому он пришел*
4. *Коммутатор «изучает» сеть - Таблица коммутации пополняется за счет изучения адресов SA поступающих пакетов*

«Изучение» может зацикливаться



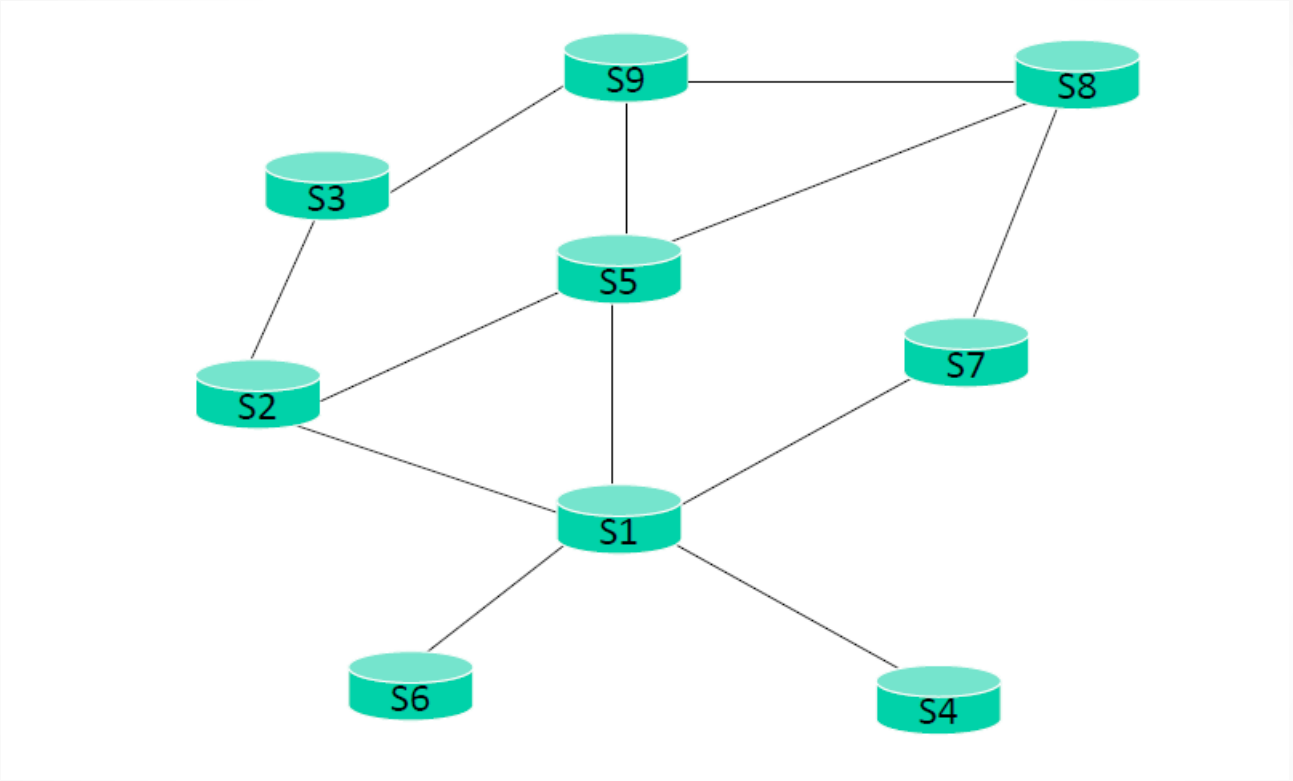
«Изучение» может зацикливаться



Предотвращение зацикливаний
(протокол соединяющего дерева - spanning tree protocol)

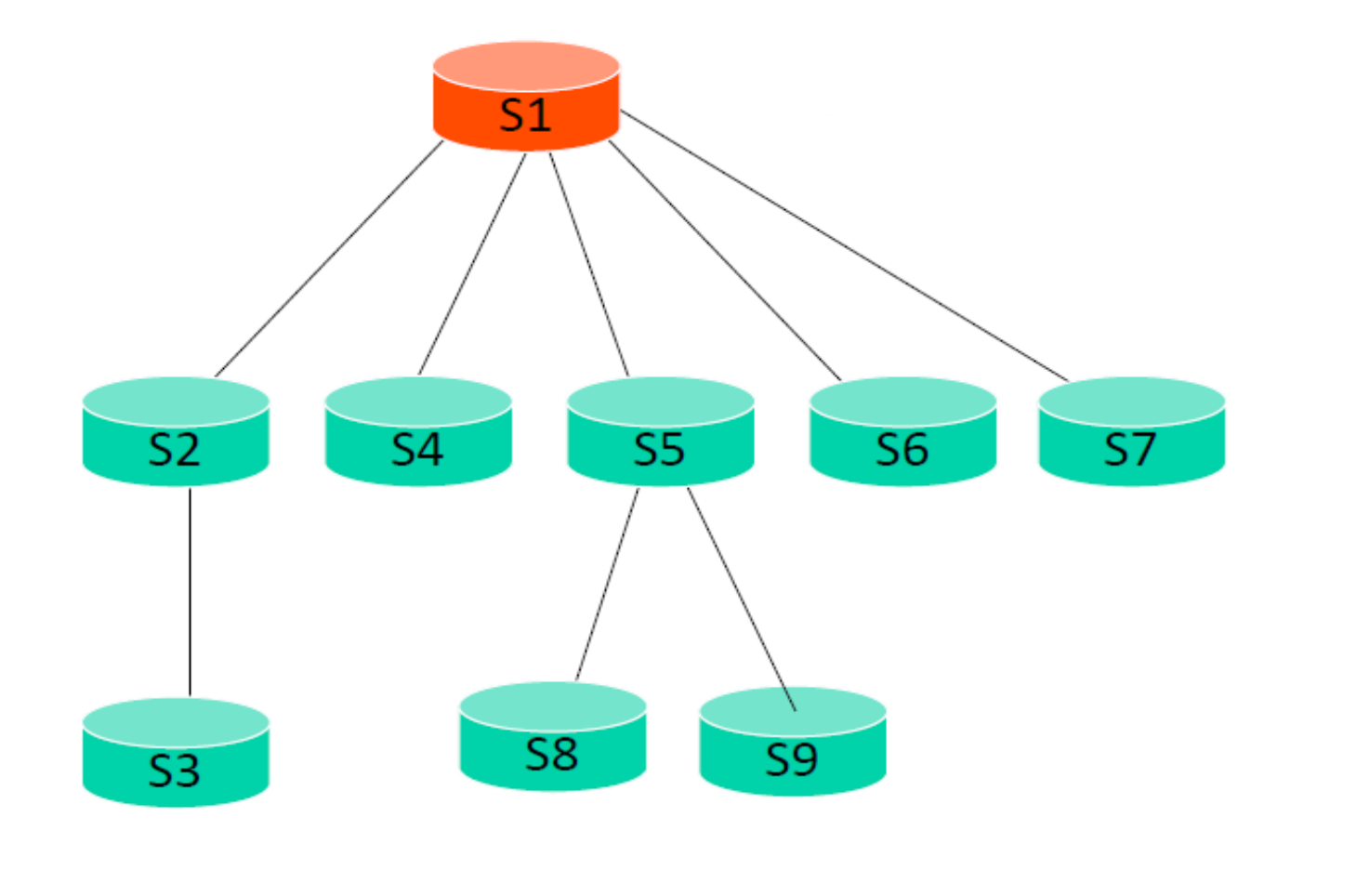
- *Топология коммутаторов – граф*
- *Протокол STP находит подграф , в котором все вершины соединены без циклов*
  - *соединяющее – к любому коммутатору есть путь*
  - *дерево – нет циклов*
- *STP распределенный протокол*
  - *какой из коммутаторов – корень дерева*
  - *каким портам разрешено рассылать кадры вдоль дерева ?*

Пример соединяющего дерева



- *выбираем корень*
- *кадр коммутируется на тот порт, который ведет от корня с наименьшим число скачков (hop)*

Соединяющее дерево для нашего примера

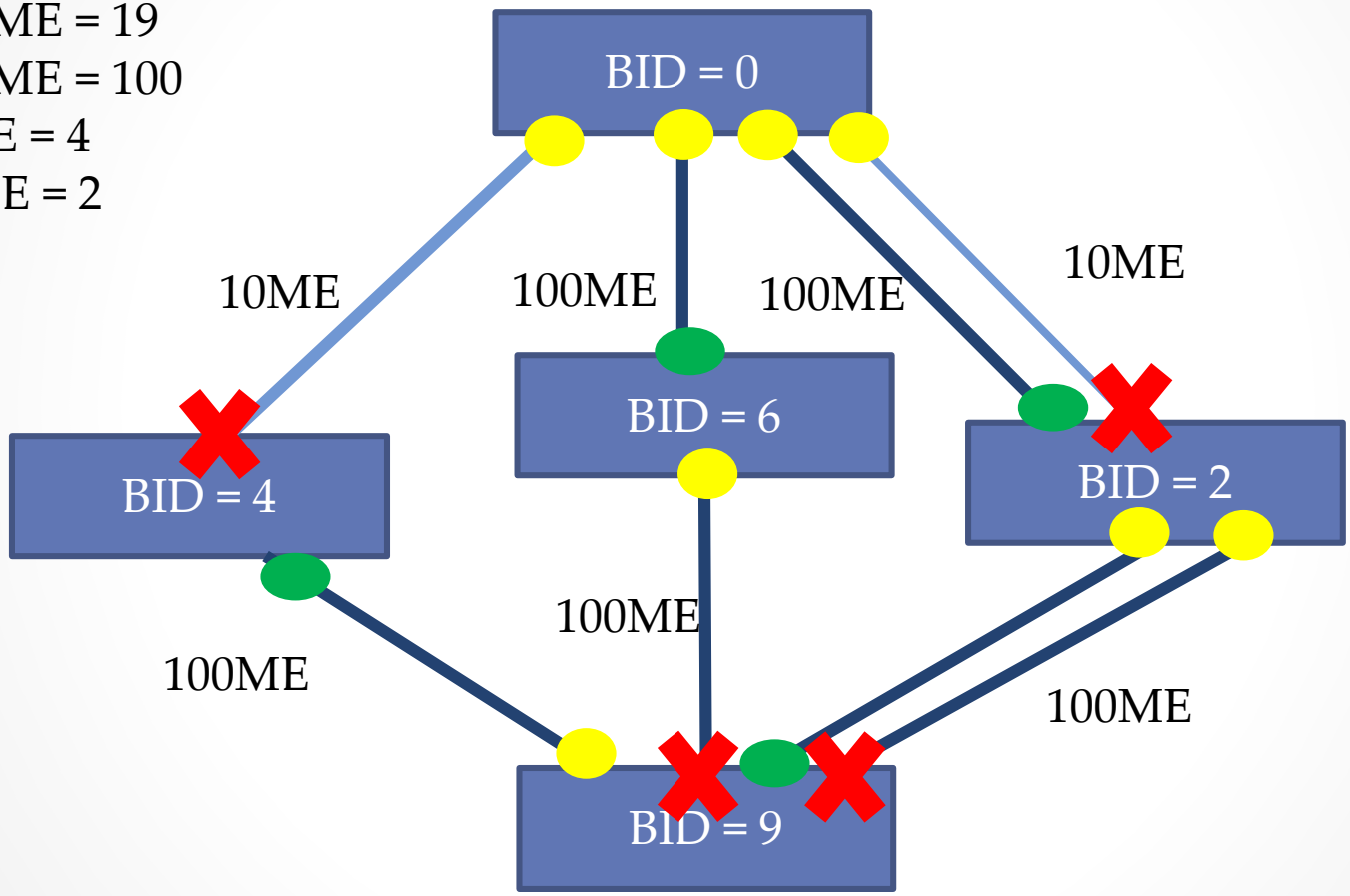


Как это работает

- После включения коммутаторов в сеть, по умолчанию каждый коммутатор считает себя корневым (root).
- Каждый коммутатор начинает посылать по всем портам конфигурационные Hello BPDU пакеты раз в 2 секунды. (BPDU (Bridge PDU)– ID отправителя, ID корня, расстояние от отправителя до корня)). Изначально все считают себя корнем (расстояние = 0).
- Если коммутатор получает BPDU с идентификатором Bridge ID меньшим, чем свой собственный, он прекращает генерировать свои BPDU и начинает ретранслировать BPDU с этим идентификатором. Таким образом в конце концов в этой сети Ethernet остаётся только один коммутатор, который продолжает генерировать и передавать собственные BPDU. Он и становится корневым (root bridge).
- Остальные коммутаторы ретранслируют BPDU корневого, добавляя в них собственный идентификатор и увеличивая счетчик пути (path cost).
- Для каждого сегмента сети, к которому присоединены два и более портов коммутаторов, происходит определение rootport, потом designated port — порта, через который BPDU, приходящие от корневого коммутатора, попадают в этот сегмент.
- После этого все порты в сегментах, к которым присоединены 2 и более портов коммутаторов, блокируются за исключением root port и designated port.
- Корневой хост продолжает посылать свои Hello BPDU раз в 2 секунды.

Построение ST

100ME = 19
10 ME = 100
1 GE = 4
10GE = 2



Заключение

- *Есть много способов маршрутизации пакетов в сети*
- *Для расчета маршрута используют протокол маршрутизации*
- *Алгоритмы маршрутизации часто используют соединяющие деревья с минимальной стоимостью до места назначения*
- *Маршрутизация с множественными путями позволяет распределять нагрузку по нескольким линиям одновременно*
- *Групповая маршрутизация обеспечивает доставку сразу нескольким хостам*