Network coding
Сегментация

м.н.с. Степанов Евгений Павлович

Программа курса

Подходы:

1. ***Управление перегрузкой***
   - Современные протоколы управления перегрузкой TCP
2. ***Демультиплексирование/мультиплексирование***
   - Многопоточные транспортные протоколы
   - Маршрутизация на уровне интернет провайдеров
   - Network Coding
3. ***Сегментация***
   - TCP Proxy
4. ***Балансировка***
   - Балансировка нагрузки и управление трафиком

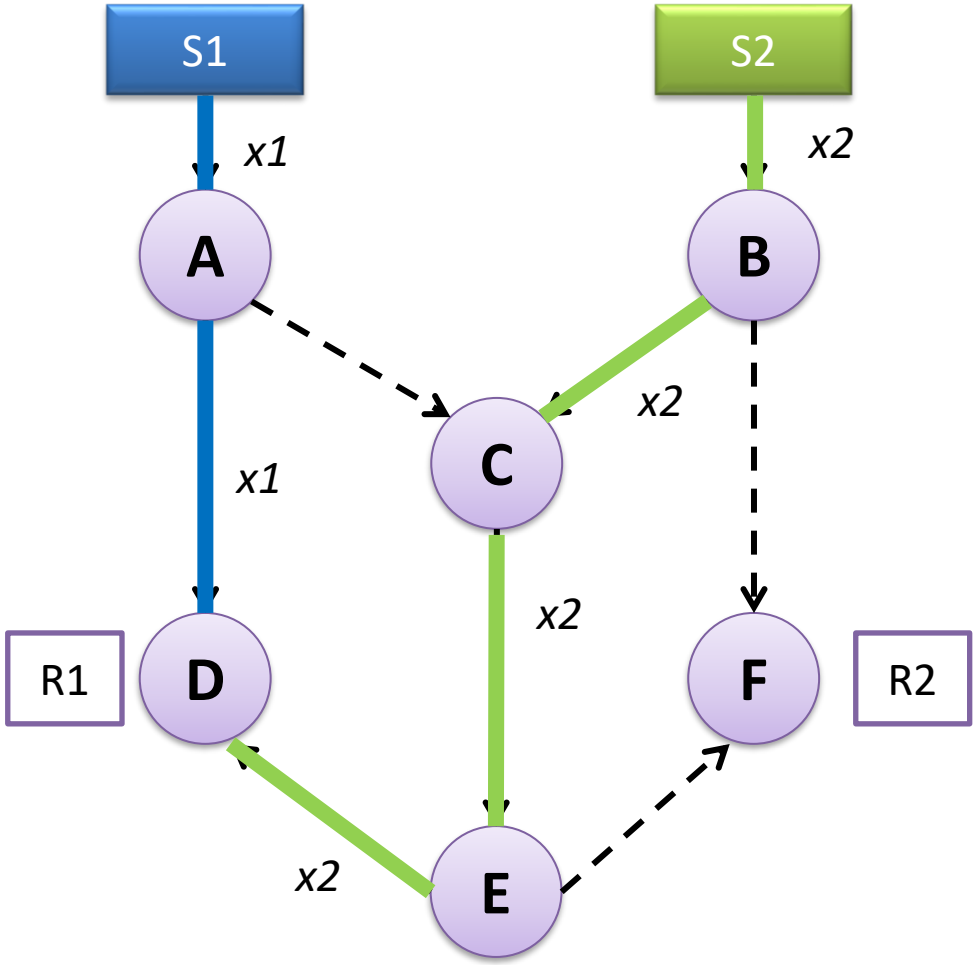
Модели:

- Сетевое исчисление: математический подход к качеству сервиса
- NS3: моделирование поведения сети с высокой точностью

Примеры:

- HTTP3/QUIC
- Управление сетевыми ресурсами в Центрах Обработки Данных
- Обеспечение качества сервиса в сетях доставки контента
- Пропускная способность по требованию

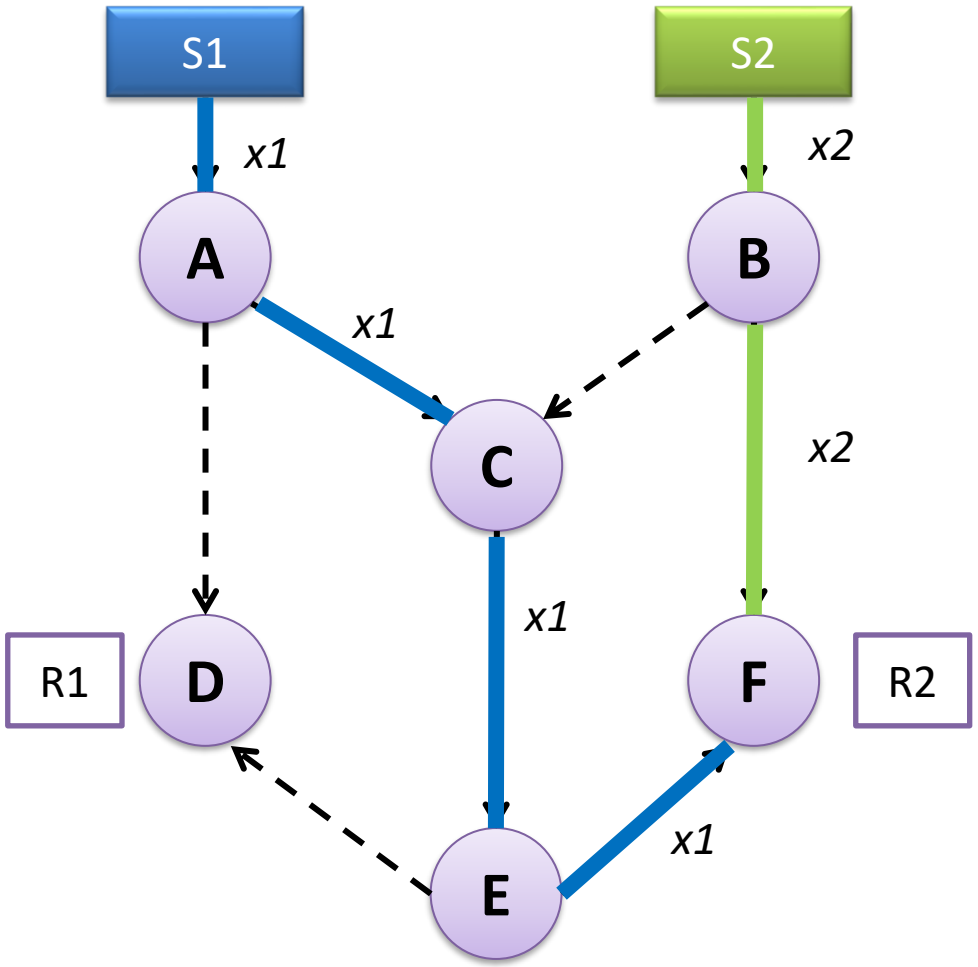
Примеры: butterfly network



- *Ориентированный граф*
- *Источники: S1 и S2*
- *Получатели: R1 и R2*
- *Слотированное время:*
  1 бит в единицу времени

Передача до R1 –
– без затруднений

Примеры: butterfly network

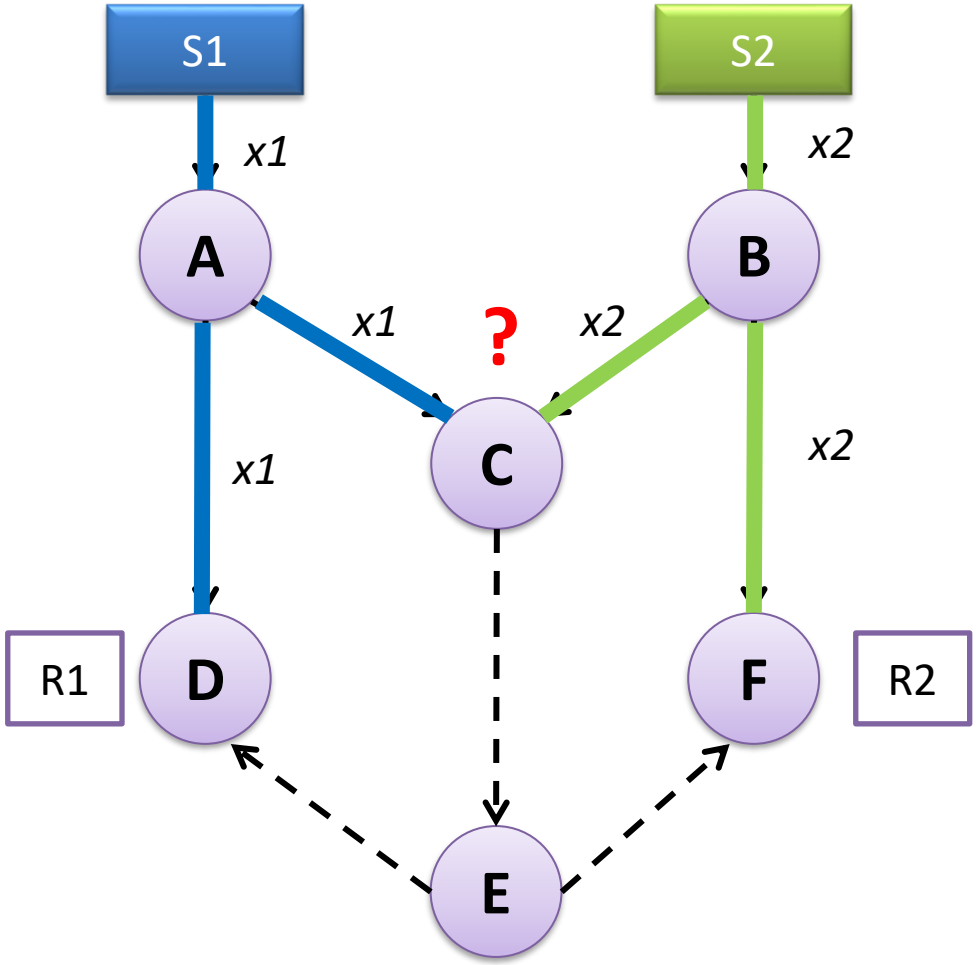


- *Ориентированный граф*
- *Источники: S1 и S2*
- *Получатели: R1 и R2*
- *Слотированное время:*
  1 бит в единицу времени

Передача до R1 –
– без затруднений

Передача до R2 –
– без затруднений

Примеры: butterfly network

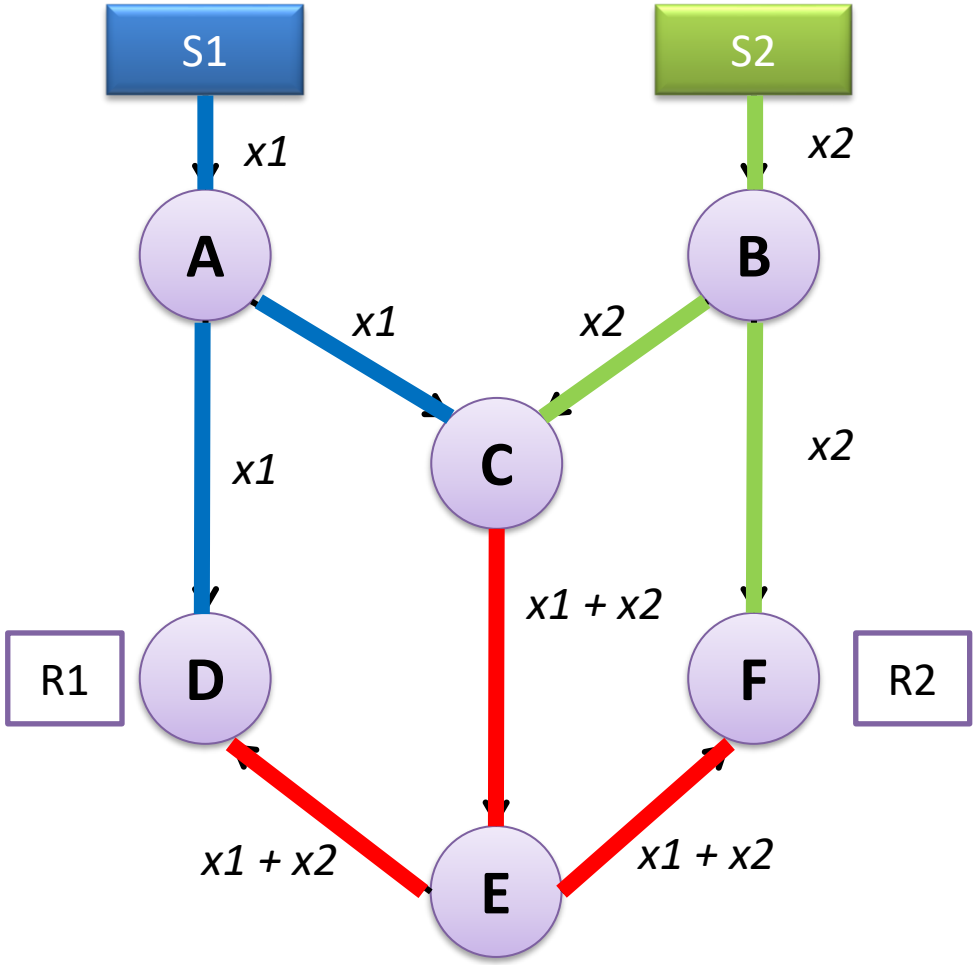


- *Ориентированный граф*
- *Источники: S1 и S2*
- *Получатели: R1 и R2*
- *Слотированное время:*
  1 бит в единицу времени

Multicast - ?

Традиционный подход: выбираем x1 или x2 и отправляем дальше

Примеры: butterfly network

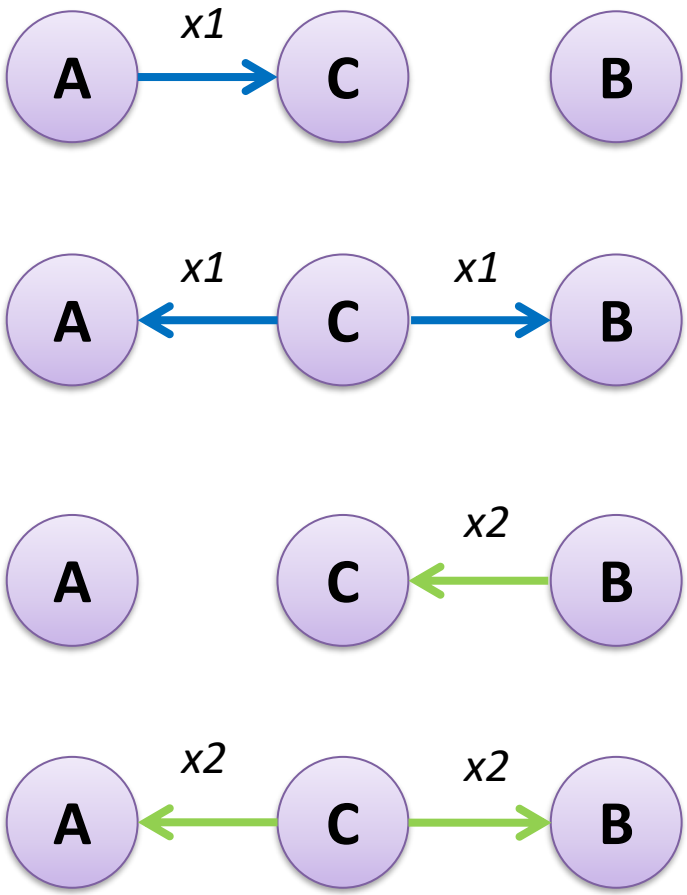


Network coding:
вычислительная мощность перестает быть узким местом – добавим дополнительную обработку в сеть

У получателя R1: {x1, x1+x2}
У получателя R2: {x2, x1+x2}

Увеличили пропускную способность!

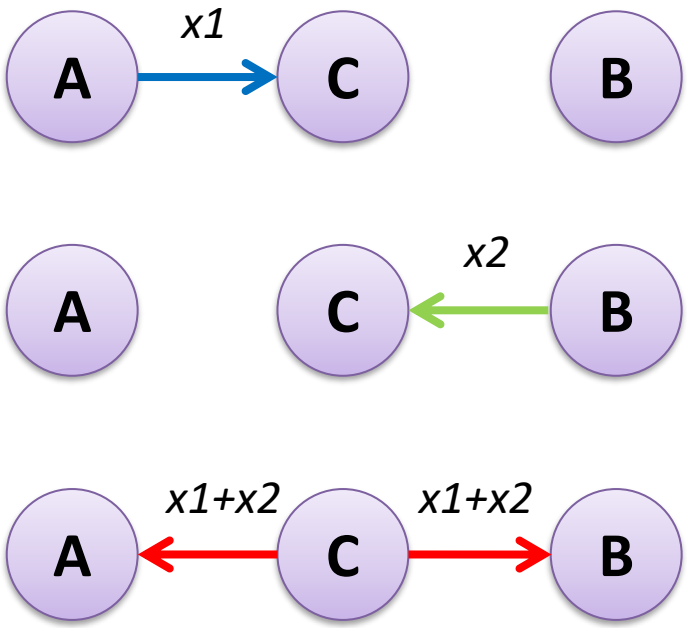
Примеры: беспроводная сеть



Устройство находится либо в режиме передачи данных, либо в режиме приема данных.

Можем ускорить процесс?

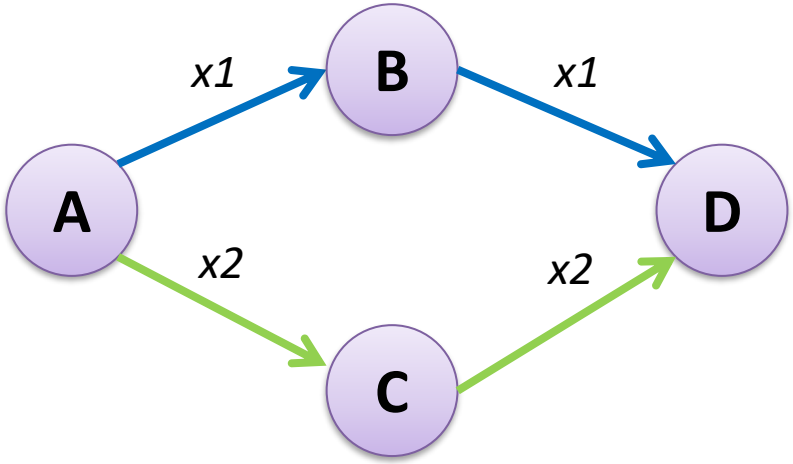
Примеры: беспроводная сеть



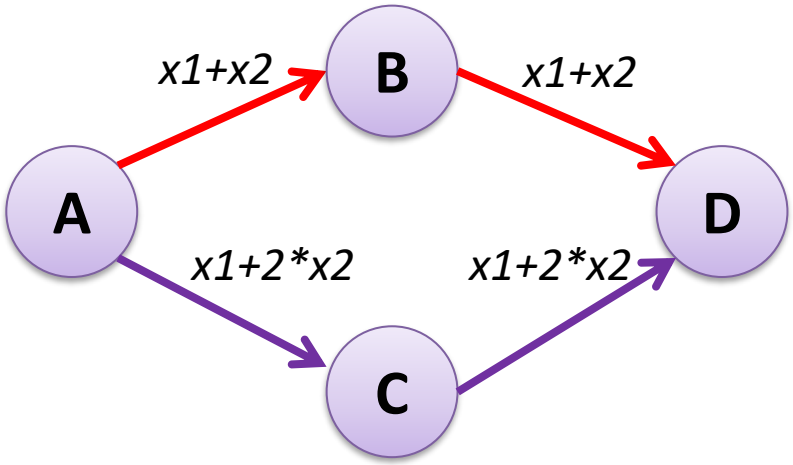
Network coding: ***Да!***

Увеличили пропускную способность, повысили энергоэффективность!

Примеры: безопасность



Нарушитель может подключиться к одной линии связи



Повысили безопасность!

Определения

Пусть $G = (V,E)$ – ориентированный граф.

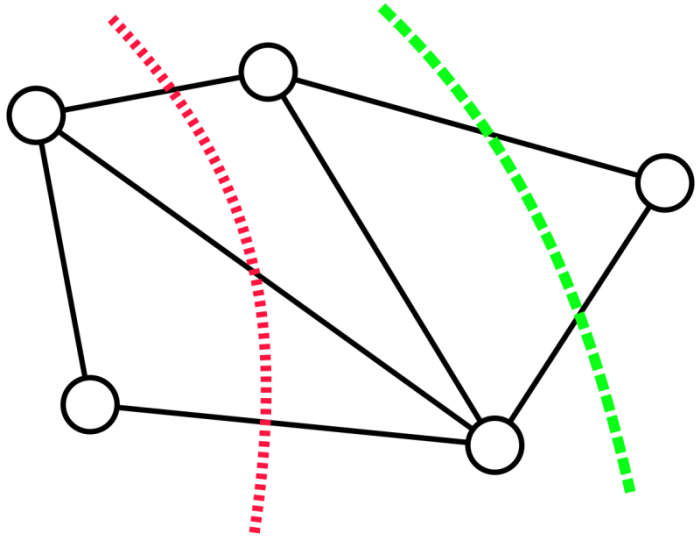
- у каждого ребра графа единичная пропускная способность
- разрешены параллельные рёбра.

Разрезом между S и R ($S, R \subset V$) называется множество рёбер графа, чьё удаление из графа разъединяет S от R.

Значением разреза является сумма пропускных способностей рёбер разреза.

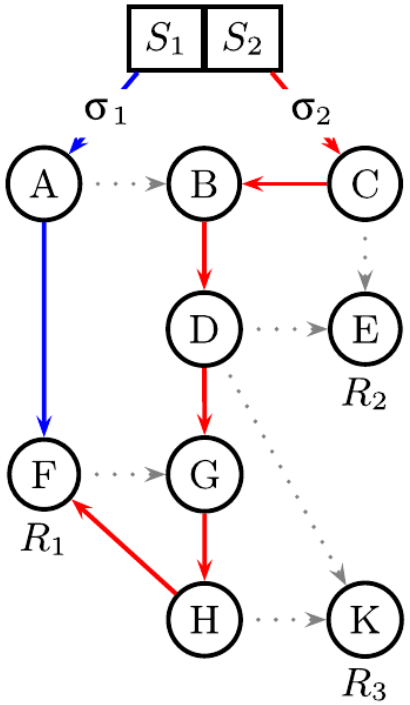
Минимальный разрез –

разрез с минимальным значением.



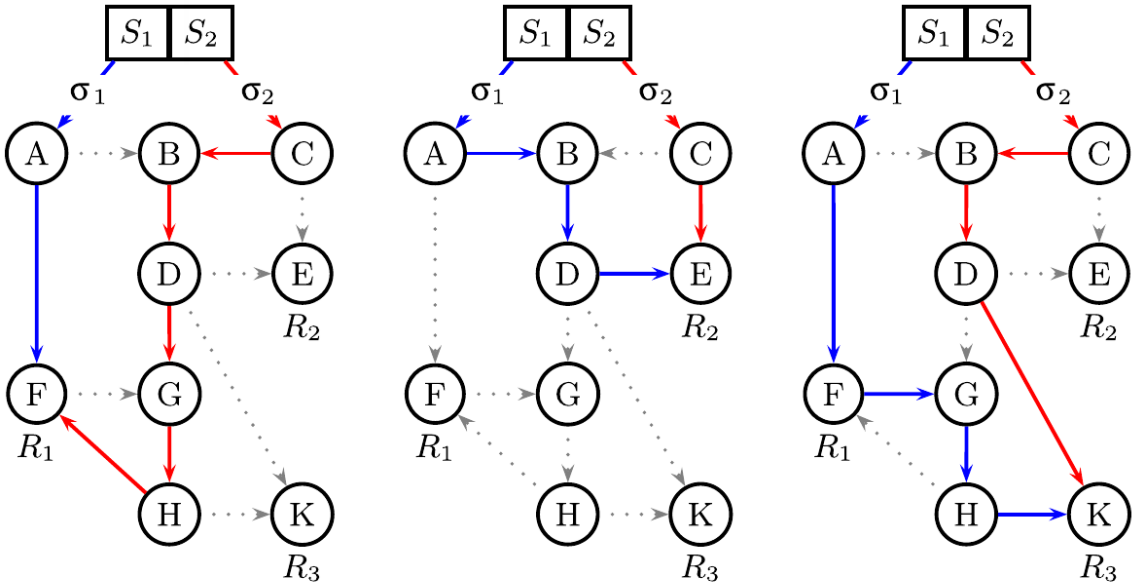
Основная теорема мультикаста

Пусть $G = (V,E)$ – ориентированный ациклический граф с рёбрами единичной пропускной способности, h источниками, расположенными на одной вершине графа и N получателями.



Основная теорема мультикаста

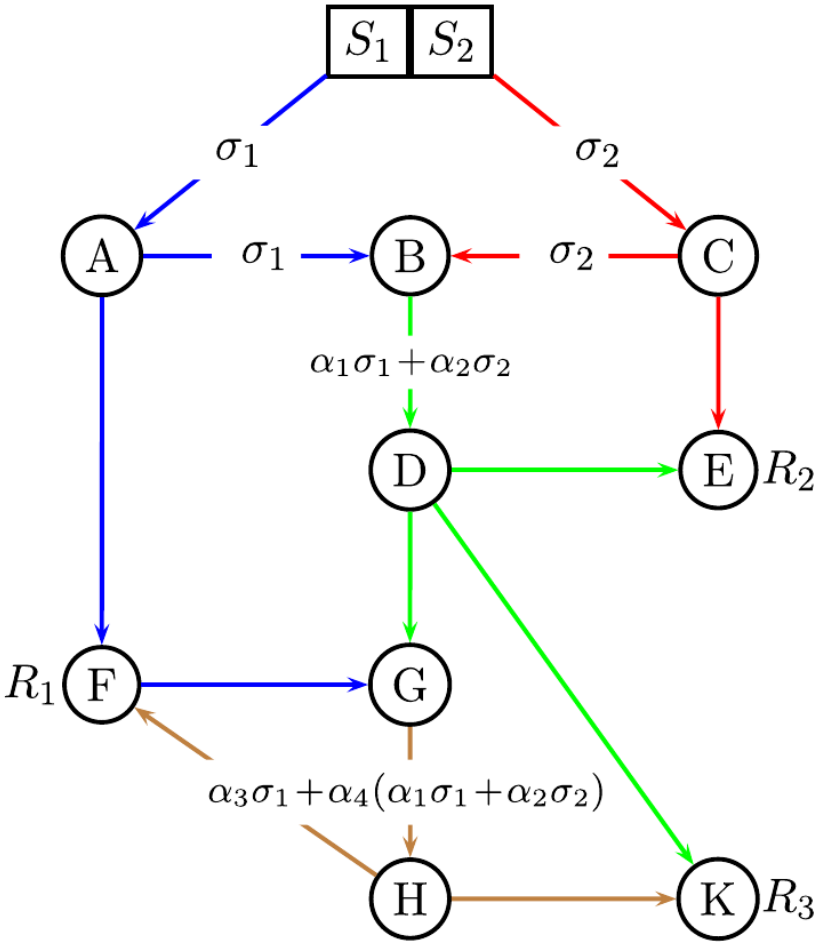
Пусть $G = (V,E)$ – ориентированный ациклический граф с рёбрами единичной пропускной способности, h источниками, расположенными на одной вершине графа и N получателями. Предположим, что значение минимального разреза до каждого получателя равно h.



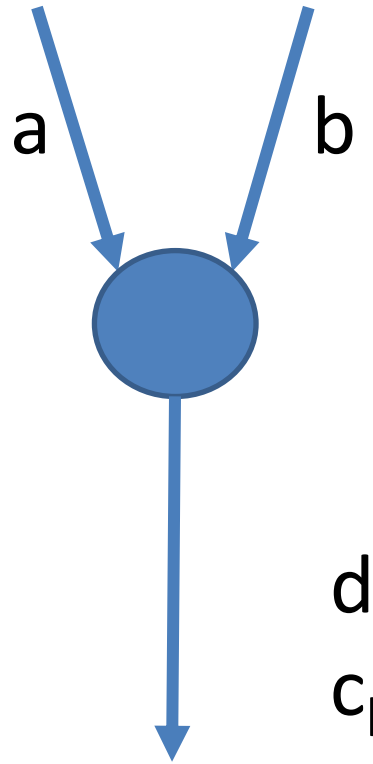
Основная теорема мультикаста

Пусть $G = (V,E)$ – ориентированный ациклический граф с рёбрами единичной пропускной способности, h источниками, расположенными на одной вершине графа и N получателями. Предположим, что значение минимального разреза до каждого получателя равно h. Тогда существует схема передачи над достаточно большим конечным полем F_q (в которой промежуточные сетевые узлы линейно комбинируют приходящие символы над F_q), которая доставляет информацию от источников одновременно всем получателям со скоростью h.

Основная теорема мультикаста



Локальный кодирующий вектор

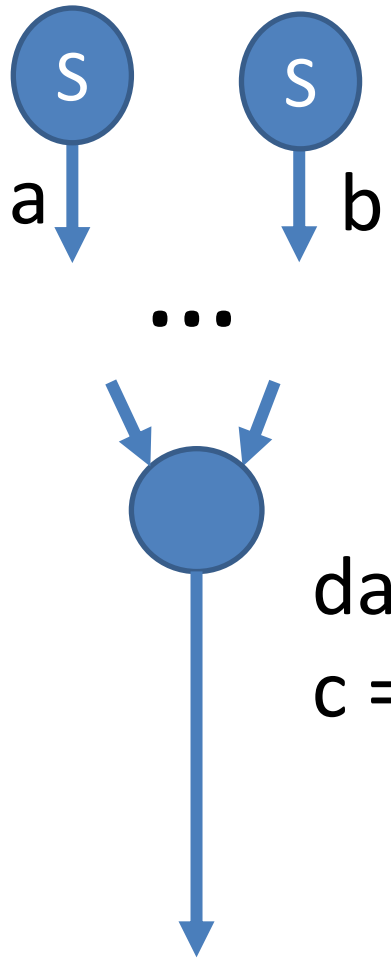


Локальным кодирующим вектором $c_{local}(e)$ ребра e является вектор коэффициентов над полем F_q которые используются для умножения входящих в ребро e символов.

$$data = \alpha_1 a + \alpha_2 b$$

$$c_{local} = (\alpha_1, \alpha_2)$$

Глобальный кодирующий вектор



(Глобальным) кодирующим вектором $c(e)$ ребра e является вектор коэффициентов, с которыми символы источников передаются (в линейной комбинации) через ребро e.

$$data = \alpha_1 a + \alpha_2 b$$

$$c = (\alpha_1, \alpha_2)$$

Матрица A_j на i-ой строке содержит кодирующий вектор последней дуги в пути (S_i, R_j).

Система уравнений получателя

Пусть ρ_i^j – символ, проходящий через последнее ребро пути (S_i,R_j). Тогда для получения исходных символов получатель R_j должен решить уравнение следующего вида:

$$\begin{bmatrix} \rho_1^j \\ \dots \\ \rho_h^j \end{bmatrix} = Aj \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \dots \\ \sigma_h \end{bmatrix}$$

Чтобы все получатели могли решить свои системы уравнений, у всех матриц A_j должен быть полный ранг.

Основная теорема мультикаста

Алгебраическая формулировка: В случае линейного сетевого кодирования существуют значения для компонентов $\{\alpha_k\}$ локальных кодирующих векторов над достаточно большим конечным полем F_q, такие что все матрицы $\mathbf{A}_j$, $1 \le j \le N$, определяющие информацию, которая приходит получателю, имеют полный ранг.

Ограничения сетевого кодирования

Необязательные:

- Рёбра единичной пропускной способности;
- Расположение источников в одном узле;
- Нулевая задержка;
- Ацикличность графа;

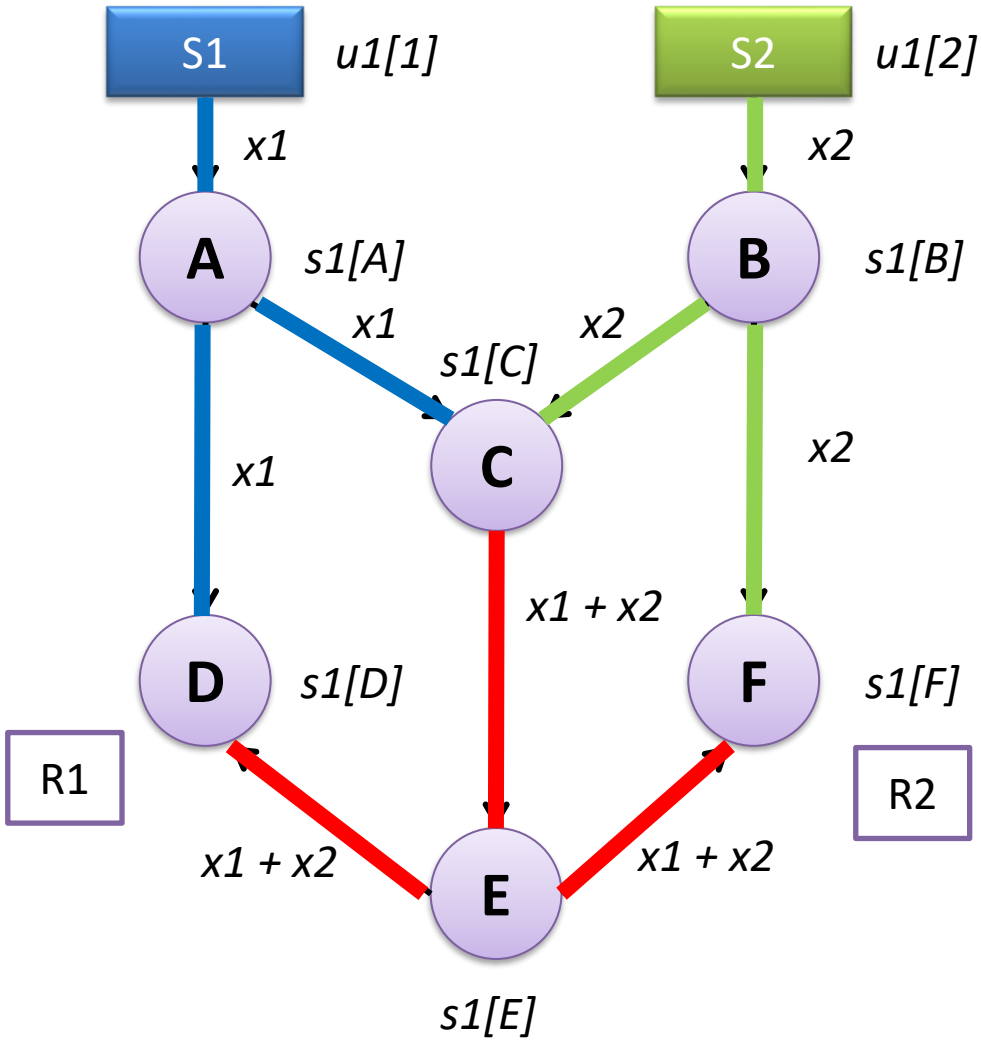
Обязательные:

- Ориентированность графа;
- Одинаковые значения минимальных разрезов.

Основные вопросы

- Какой размер алфавита необходим для реализации network coding?
- В каком месте проводить операции network coding?
- С какой скоростью отправители могут генерировать данные для передачи?
- Какое преимущество у сетевого кодирования?

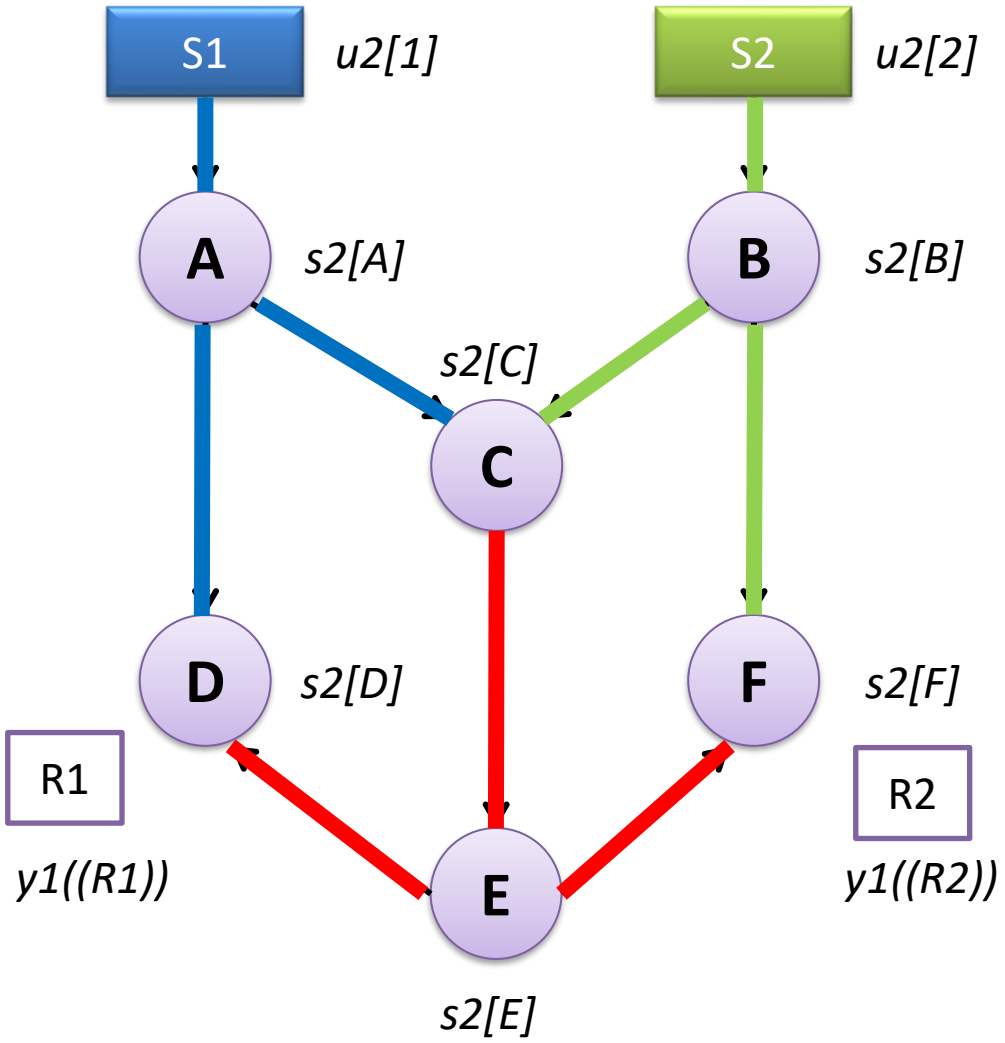
Алгебраическая модель



u_k — входные значения

s_k — вектор состояния

Алгебраическая модель



u_k — входные значения

s_k — вектор состояния

y_k — выходные значения

Алгебраическая модель

Пространство состояний

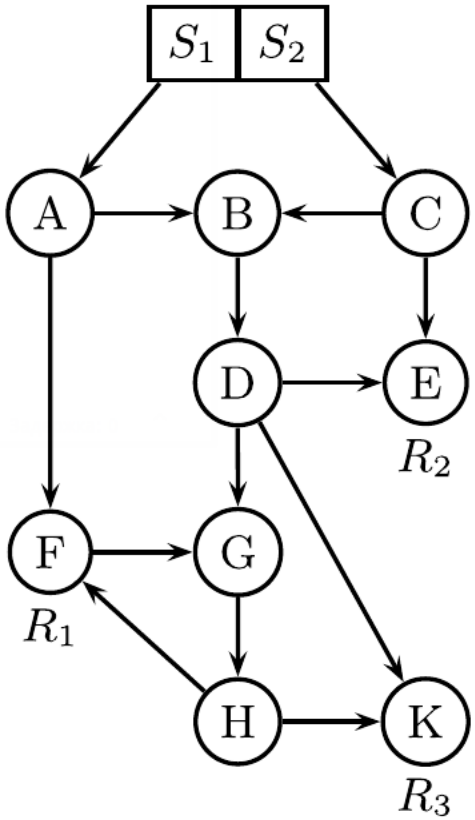
$$\begin{cases} s_{k+1} = As_k + Bu_k, \\ y_k = C_j s_k + D_j u_k \end{cases}$$

$$A_j = D_j + C_j(I - A)^{-1}B$$

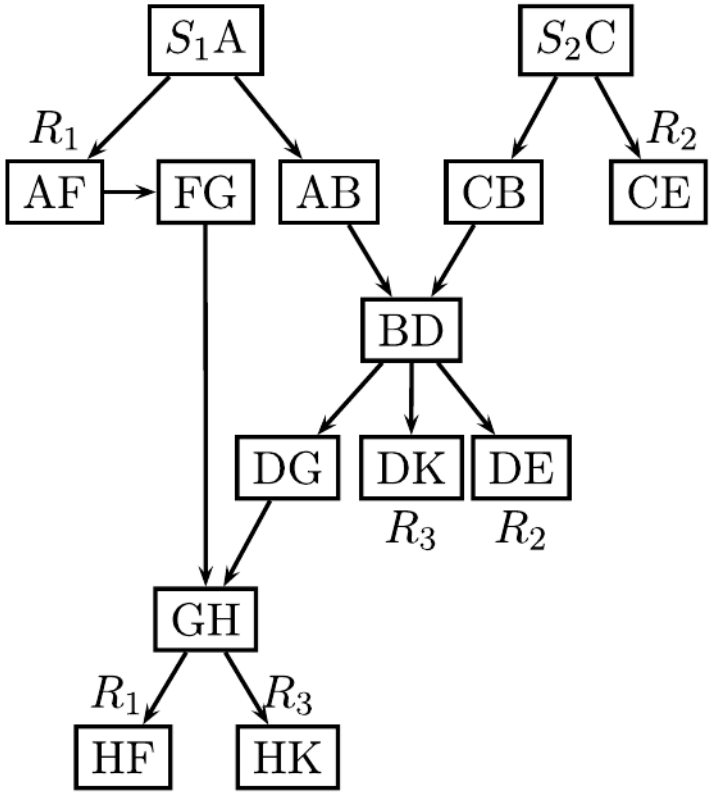
- u_k – входные значения
- y_k – выходные значения
- s_k – вектор состояния
- A, B, C_j, D_j – матрицы связей (топология сети, связи со входами и выходами)
- $A = \{\alpha\}_{ij}$

Теорема: для мультикаст-сети алфавит размера $\boldsymbol{q > N}$ всегда является достаточным

Комбинаторная модель

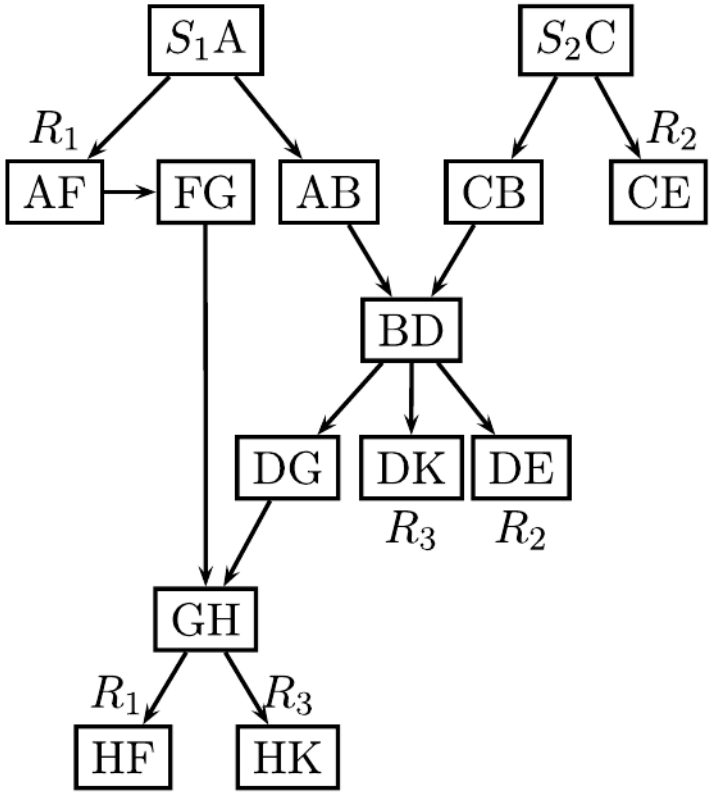


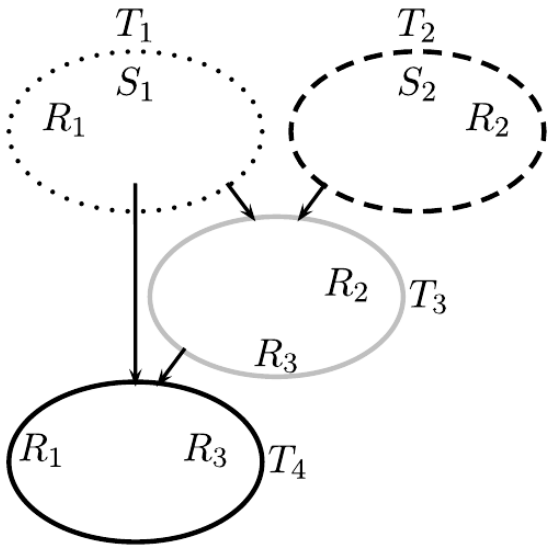
Граф сети



Реберный граф сети

Комбинаторная модель



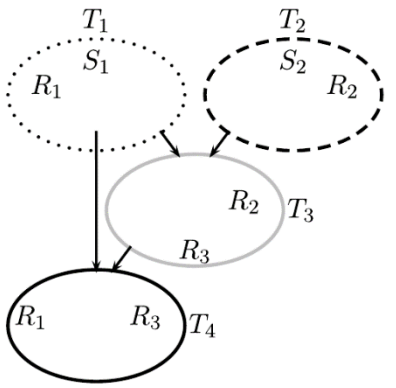


Реберный граф сети

Граф поддеревьев

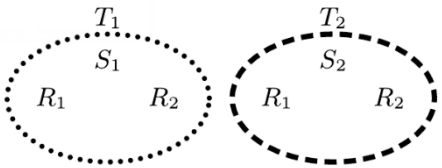
Комбинаторная модель

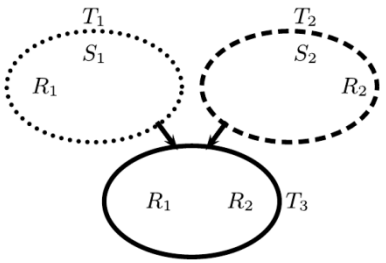
- Граф поддеревьев с мультикаст св-вом называется *минимальным,* если удаление любого ребра приводит к нарушению мультикаст св-ва
- Минимальные графы поддеревьев обладают рядом свойств
- Перечисление минимальных графов



Граф поддеревьев

Лемма: для сети с двумя источниками и двумя получателями существует ровно два минимальных графа поддеревьев





Информационно-теоретическая модель

- Отправитель генерирует B сообщений со скоростью ω_S
- Дискретное время
- На отправителе $|Out(S)|$ функций $\{f_i^S\}$
- На вершине v $|Out(v)|$ функций f_i^v

$$f_i^S : 2^{n\omega_S} \to 2^n$$

$$f_i^v : 2^{n|In(v)|} \to 2^n$$

Получатель принимает со скоростью $\frac{n\omega_S B}{n(B+|V|)} \to \omega_S$ при $B \gg |V|$

- Результат верен, если можно различить получаемые сообщения
- Рассчитываем вероятность потери сообщения

$$P = 2^{-n(|v\boldsymbol{\nu}|-\omega_S)}$$

$$\omega_S < m = \min_{\nu} |vS|$$

Задача линейного программирования

Max-Flow LP:

maximize f_{RS}

subject to

$$\sum_{(v,u)\in E} f_{vu} = \sum_{(u,w)\in E} f_{uw}, \quad \forall\, u \in V \quad \text{(flow conservation)}$$

$$f_{vu} \le c_{vu}, \quad \forall\, (v,u) \in E \quad \text{(capacity constraints)}$$

$$f_{vu} \ge 0, \quad \forall\, (v,u) \in E$$

Задача линейного программирования

Network Coding LP:

maximize χ

subject to

$$f^i_{R_i S} \geq \chi, \quad \forall\, i$$

$$\sum_{(v,u)\in E} f^i_{vu} = \sum_{(u,w)\in E} f^i_{uw}, \quad \forall\, u \in V, \quad \forall\, i \quad \text{(flow conservation)}$$

$$f^i_{vu} \leq f_{vu}, \quad \forall\, (v,u) \in E \quad \text{(conceptual flow constraints)}$$

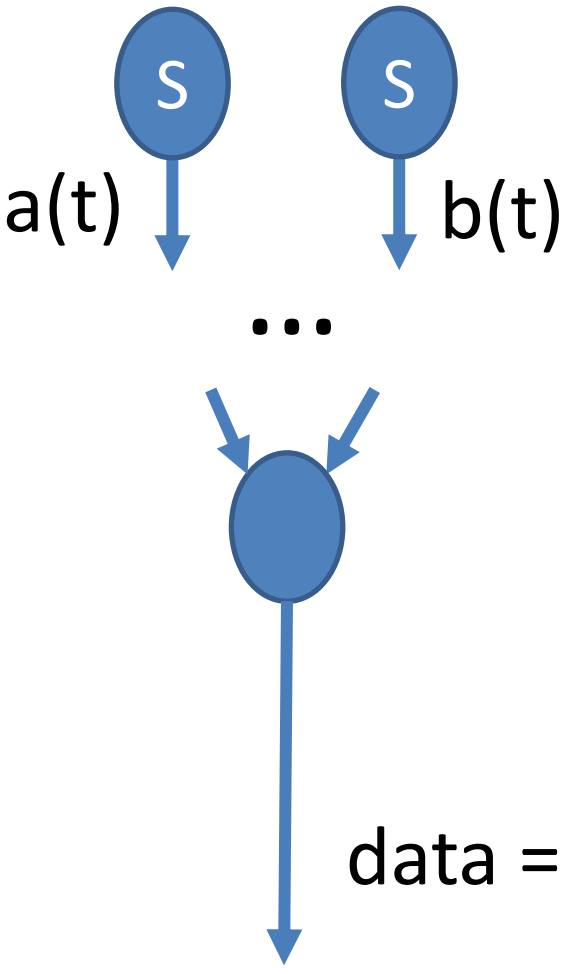
$$f_{vu} \leq c_{vu}, \quad \forall\, (v,u) \in E \quad \text{(capacity constraints)}$$

$$f^i_{vu} \geq 0 \text{ and } f_{vu} \geq 0, \quad \forall\, (v,u) \in E, \quad \forall\, i$$

Построение сетевого кода

- Найти h непересекающихся маршрутов до каждого получателя, найти множество кодирующих точек и построить минимальную конфигурацию.
- Жадным алгоритмом ищем кодирующие вектора

Сети с задержками: проблема



В узел сети приходят символы, посланные источниками в разные моменты времени.

Узлы составляют линейную комбинацию и посылают далее.

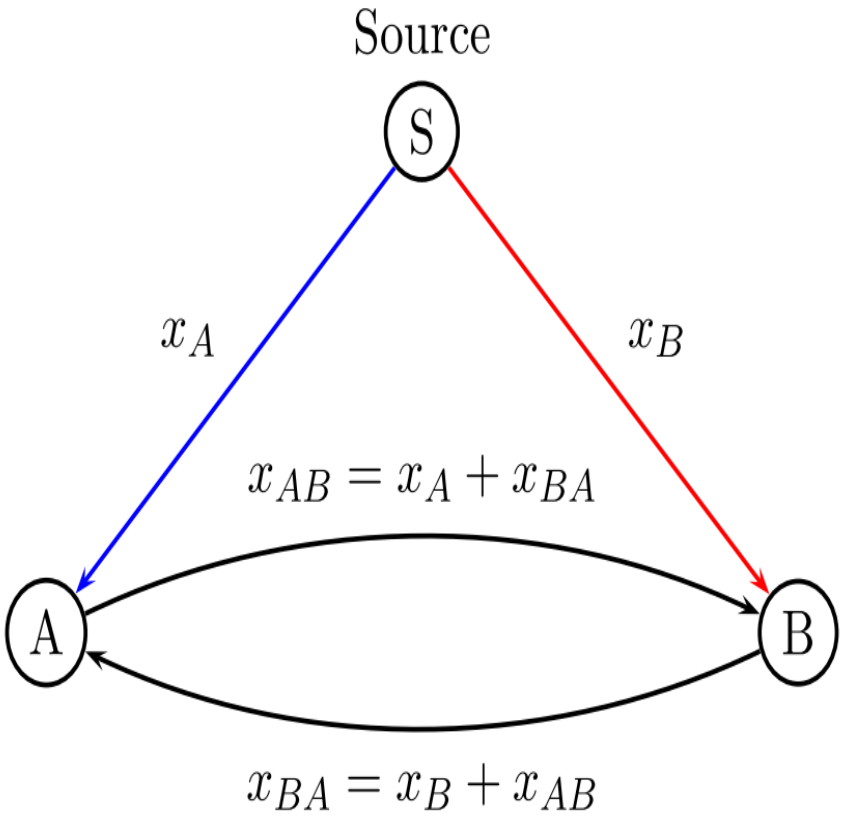
Получателю приходят линейные комбинации из данных, посланных в разное время.

$$data = \alpha_1 a(t_i) + \alpha_2 b(t_j)$$

Сети с задержками: подходы

1. Добавление к каждому пакету метки поколения. Промежуточный узел производит кодирование только при получении всех пакетов поколения. Хорошо подходит для сетей со значительными различиями в задержке между путями.
2. Разбиение времени на слоты и использование оператора задержки D. Можно кодировать все приходящие символы вне зависимости от их поколения, а затем решать на стороне получателя систему уравнений с операторами задержки.

Сети с циклами: проблема



$x_{AB} = x_A + x_{BA} = x_A + x_B + x_{AB} \Rightarrow$

$x_A + x_B = 0$

Сети с циклами: подходы

Необходимо ввести задержки, чтобы не было циклов с нулевой задержкой. Затем используются следующие подходы:

1. Утверждается, что сети с циклами можно рассматривать в качестве свёрточных кодов, для которых применимы специальные алгоритмы декодирования (например, алгоритм Витерби).
2. Можно попытаться удалить циклы. Возможно только в случае простых циклов(которые не имеют общих рёбер).

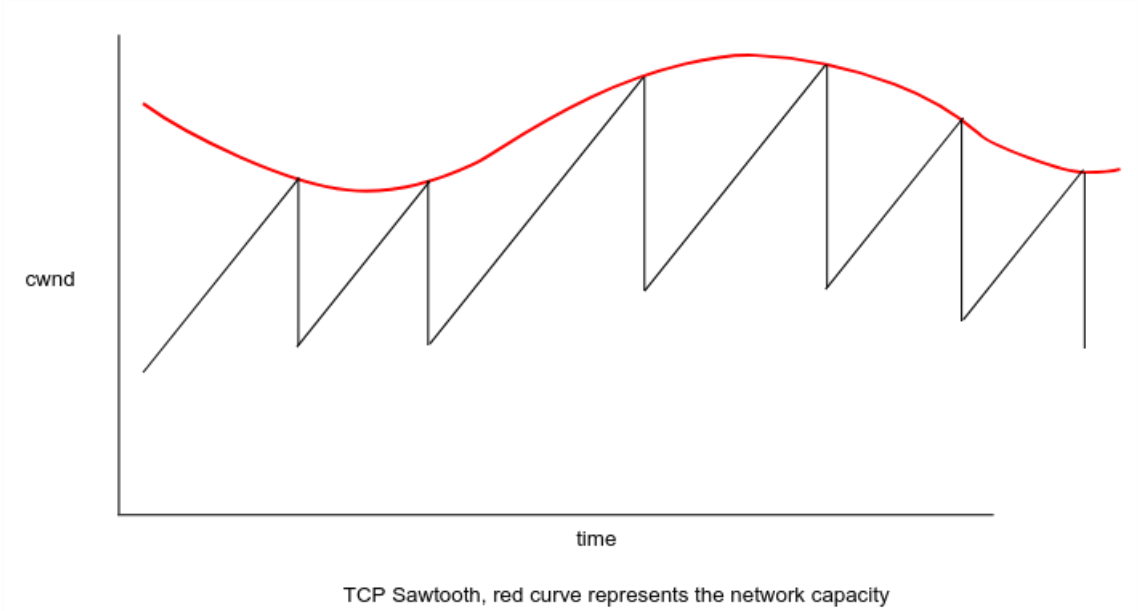
Проблемы сетевого кодирования

- Много теории, практически нет случаев успешного применения;
- Во многих работах предполагается, что узлы сети кооперируются, а не пытаются послать как можно больше;
- Испытания в реальных сетях часто не показывали преимуществ кодирования.

Проксирование как метод улучшения качества сервиса

Управление перегрузкой

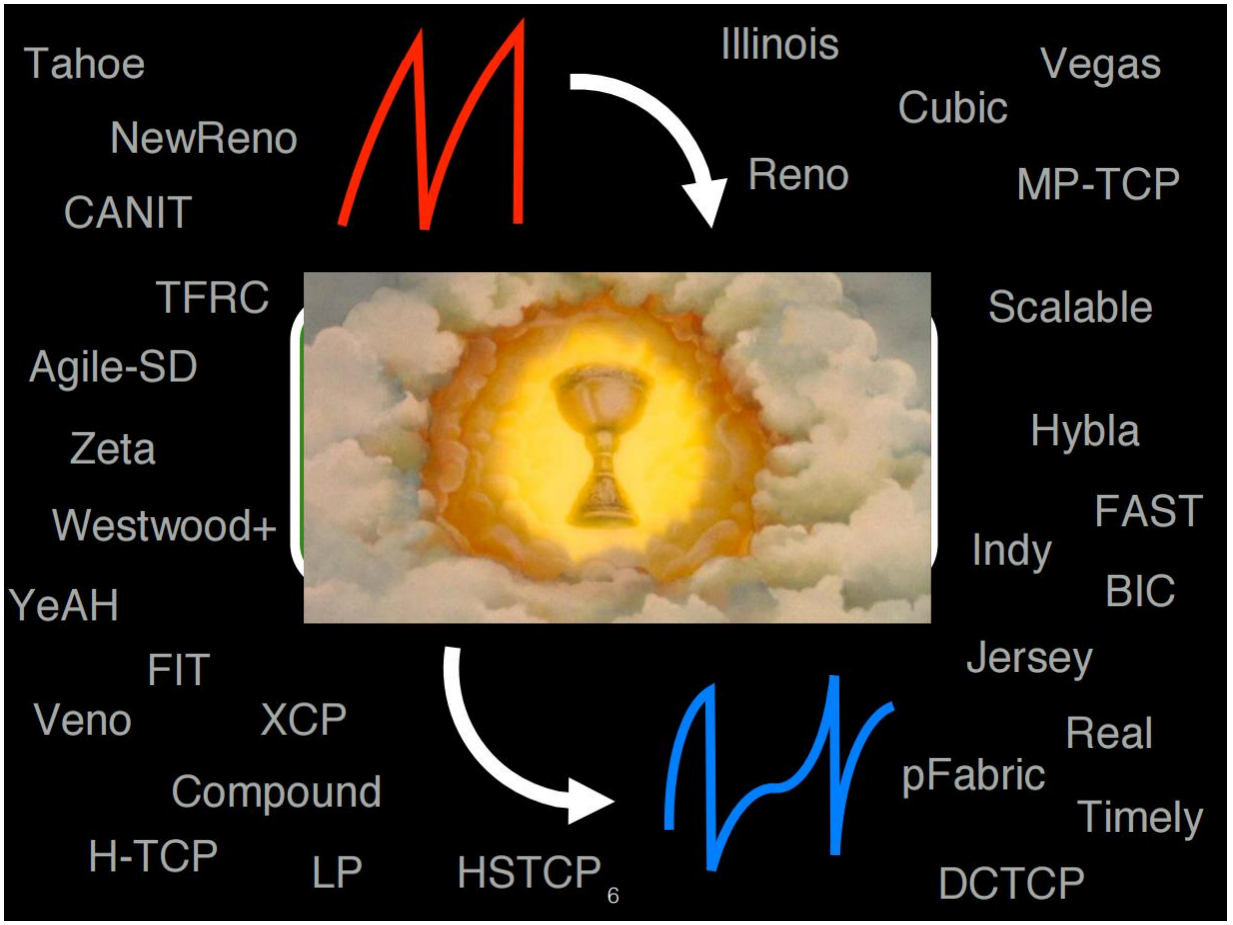
- Определяем интенсивность отправки пакетов в сеть
- Пытаемся достичь максимальной доступной пропускной способности, не создавая при этом перегрузок



TCP Sawtooth, red curve represents the network capacity

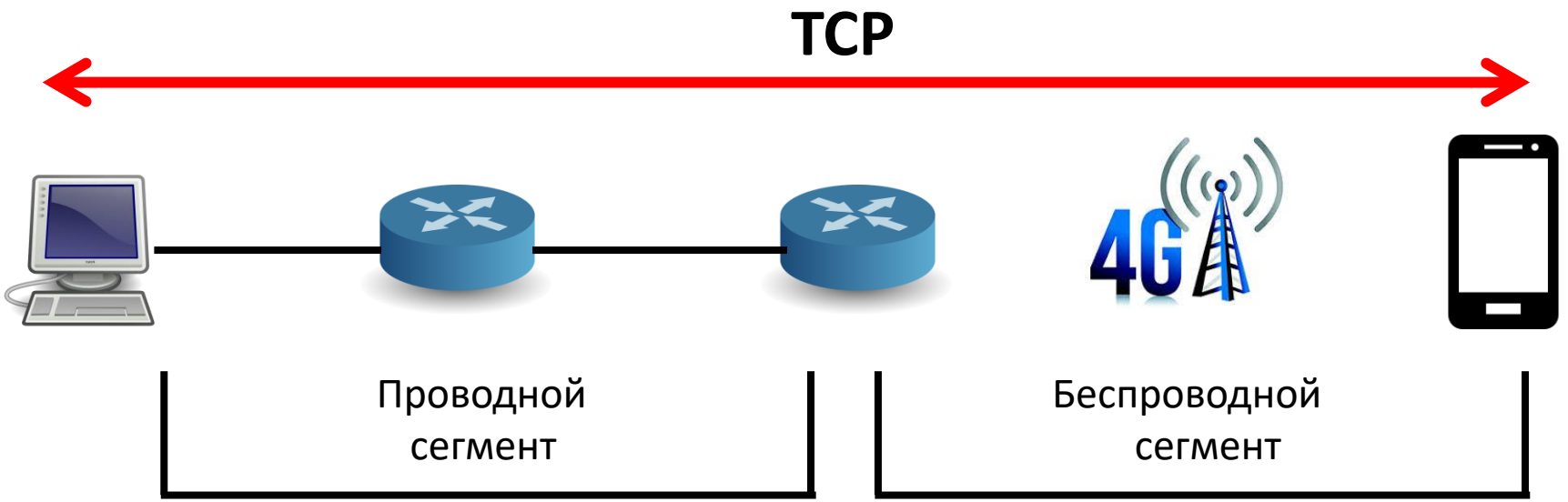
Многообразие алгоритмов

Работа алгоритма управления перегрузкой зависит от:



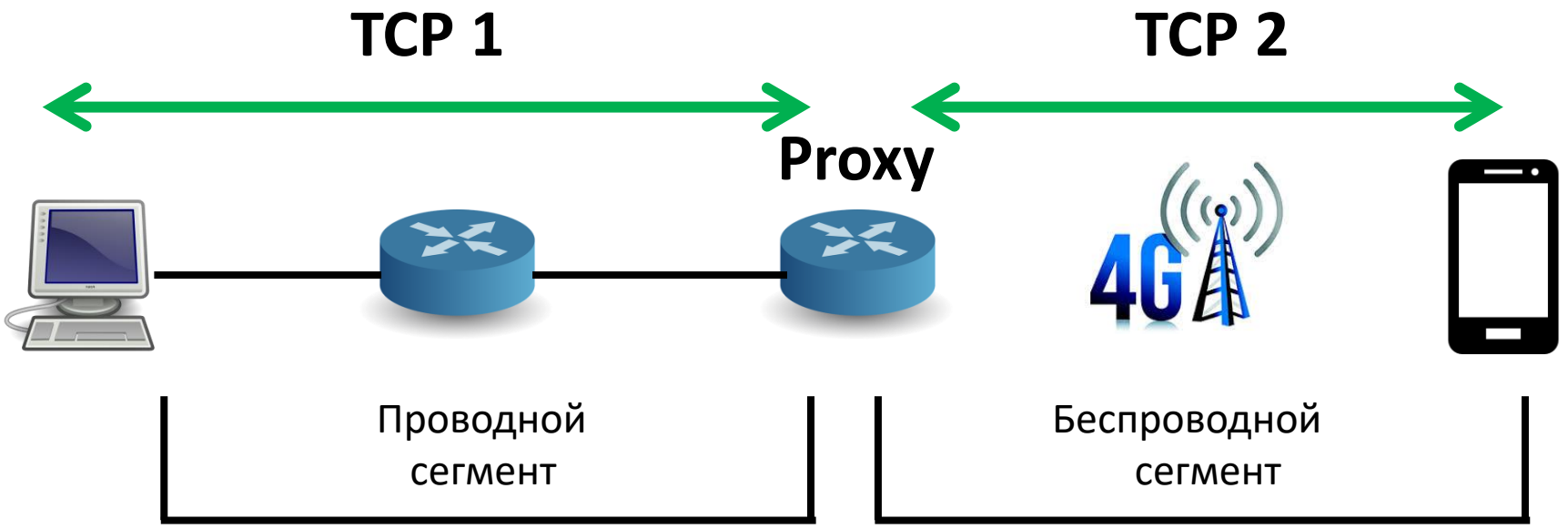
- Задержки
- Надежности канала
- Нагрузки в сети
- Возможностей оборудования
- Политики очередизации

Разнородная среда передачи данных



Универсальный алгоритм будет проигрывать специализированным

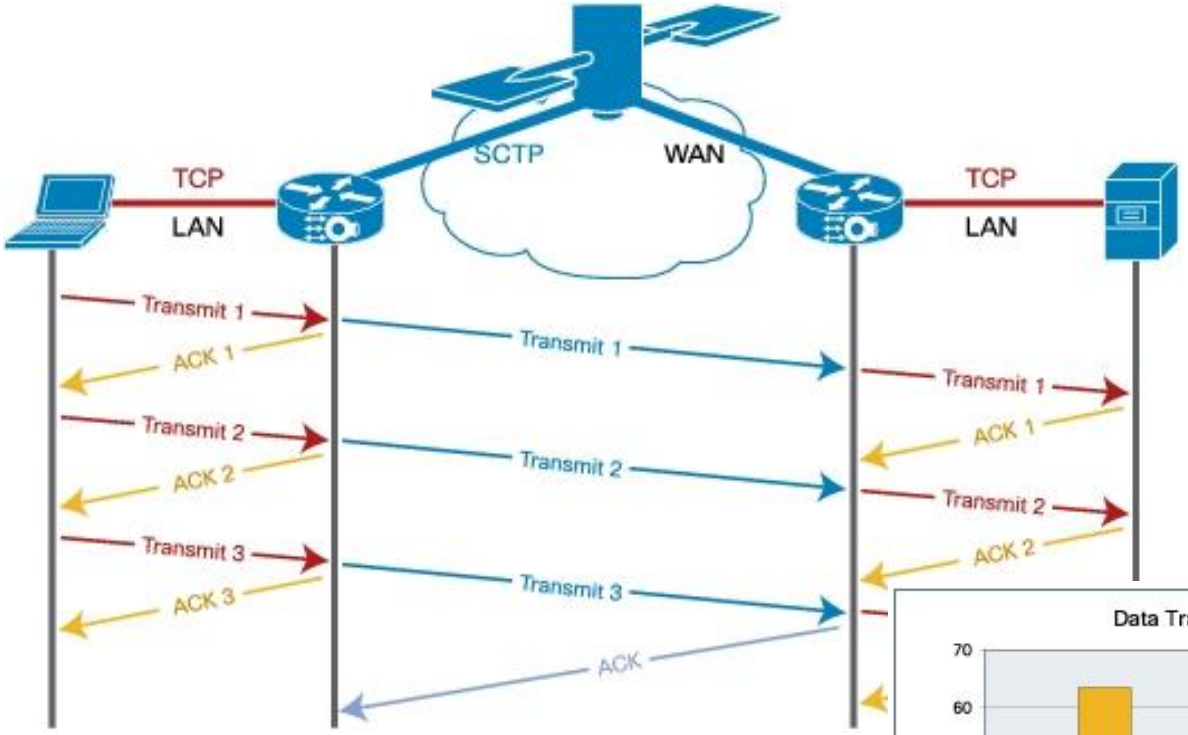
Split TCP

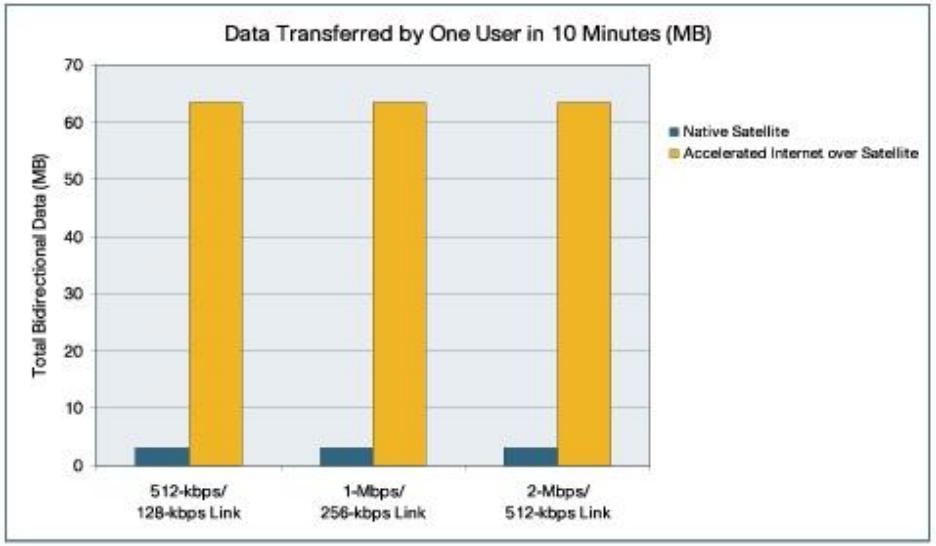


- Увеличение скорости реакции на изменение ситуации в сети
- Уменьшение задержки
- Увеличение скорости передачи

- Proxy (POP)

Cisco NCE


SCTP
WAN
TCP
LAN
TCP
LAN
Transmit 1
ACK 1
Transmit 1
Transmit 1
ACK 1
Transmit 2
ACK 2
Transmit 2
Transmit 2
ACK 2
Transmit 3
ACK 3
Transmit 3
ACK


Data Transferred by One User in 10 Minutes (MB)
Total Bidirectional Data (MB)
70
60
50
40
30
20
10
0
512-kbps/
128-kbps Link
1-Mbps/
256-kbps Link
2-Mbps/
512-kbps Link
Native Satellite
Accelerated Internet over Satellite

Split TCP efficiency model

R_{ns} — non-split connection rate

R_{sp} — split connection rate

R_1 — TCP1 rate

R_2 — TCP2 rate

T — non-split connection RTT

q — non-split connection packet loss probability

T_2 — TCP2 RTT

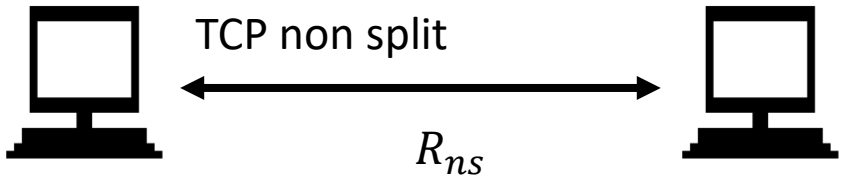
q_2 — TCP2 packet loss probability

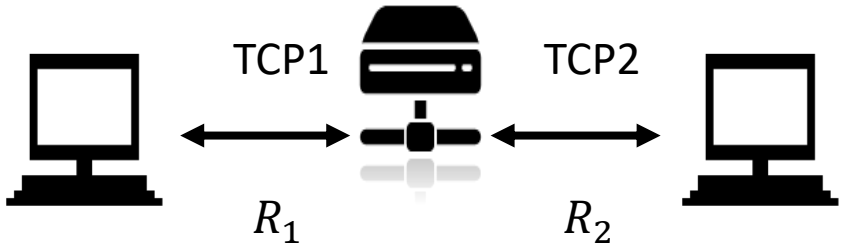
$$R_{ns} = \frac{1}{T}\sqrt{\frac{3}{2q}} \qquad (1)$$

$$R_2 = \frac{1}{T_2}\sqrt{\frac{3}{2q_2}} \qquad (2)$$

$$\frac{R_{sp}}{R_{ns}} = \frac{T}{T_2}\sqrt{\frac{q}{q_2}} \qquad (3)$$

$$\frac{R_{sp}}{R_{ns}} = \frac{T}{T_2} > 1 \qquad (4)$$

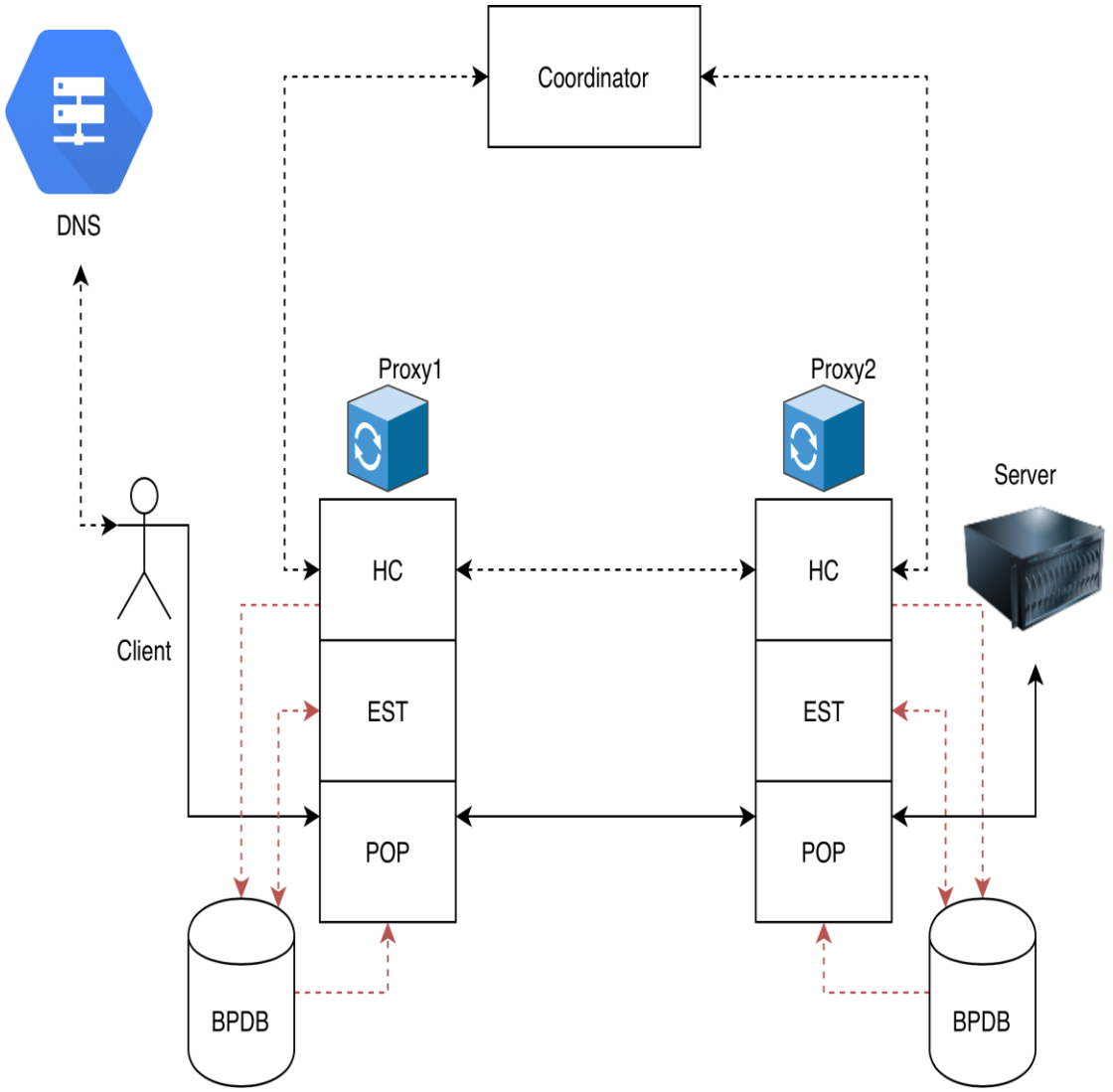




Model restrictions

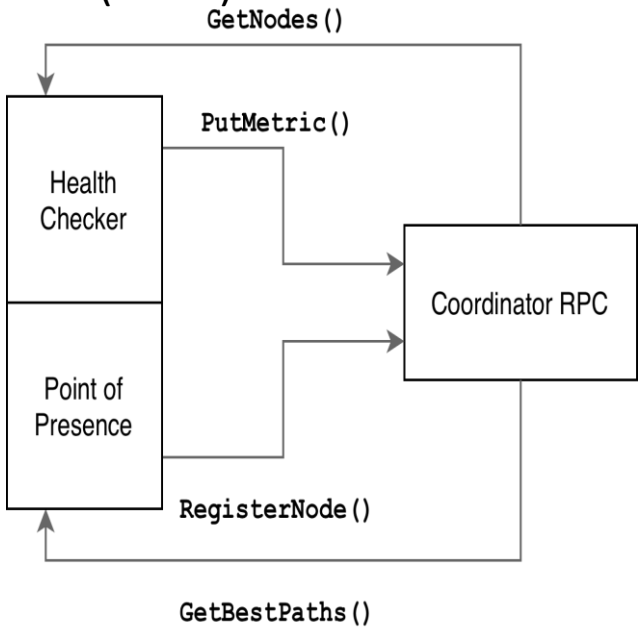
1. The average rate estimation is derived for TCP Reno.
2. The connection is network limited.
3. The obtained estimations are not suitable for short-lived connections.
4. The model doesn’t take into account proxy overhead.

Dynamic Split TCP



Components:

1. DNS server (DNS)
2. Coordinator
3. Health-Checker (HC)
4. Point of presence (POP)
5. Local path estimator (EST)
6. Best Paths DataBase (BPDB)



Нерешенные вопросы

- подбор оптимальной конфигурации в параметрах агентов сегментированного соединения;
- количество и размещение прокси-серверов, реализующих сегментированный подход.

Программа курса

Подходы:

1. ***Управление перегрузкой***
   - Современные протоколы управления перегрузкой TCP
2. ***Демультиплексирование/мультиплексирование***
   - Многопоточные транспортные протоколы
   - Маршрутизация на уровне интернет провайдеров
   - Network Coding
3. ***Сегментация***
   - TCP Proxy
4. ***Балансировка***
   - Балансировка нагрузки и управление трафиком

Модели:

- Сетевое исчисление: математический подход к качеству сервиса
- NS3: моделирование поведения сети с высокой точностью

Примеры:

- HTTP3/QUIC
- Управление сетевыми ресурсами в Центрах Обработки Данных
- Обеспечение качества сервиса в сетях доставки контента
- Пропускная способность по требованию