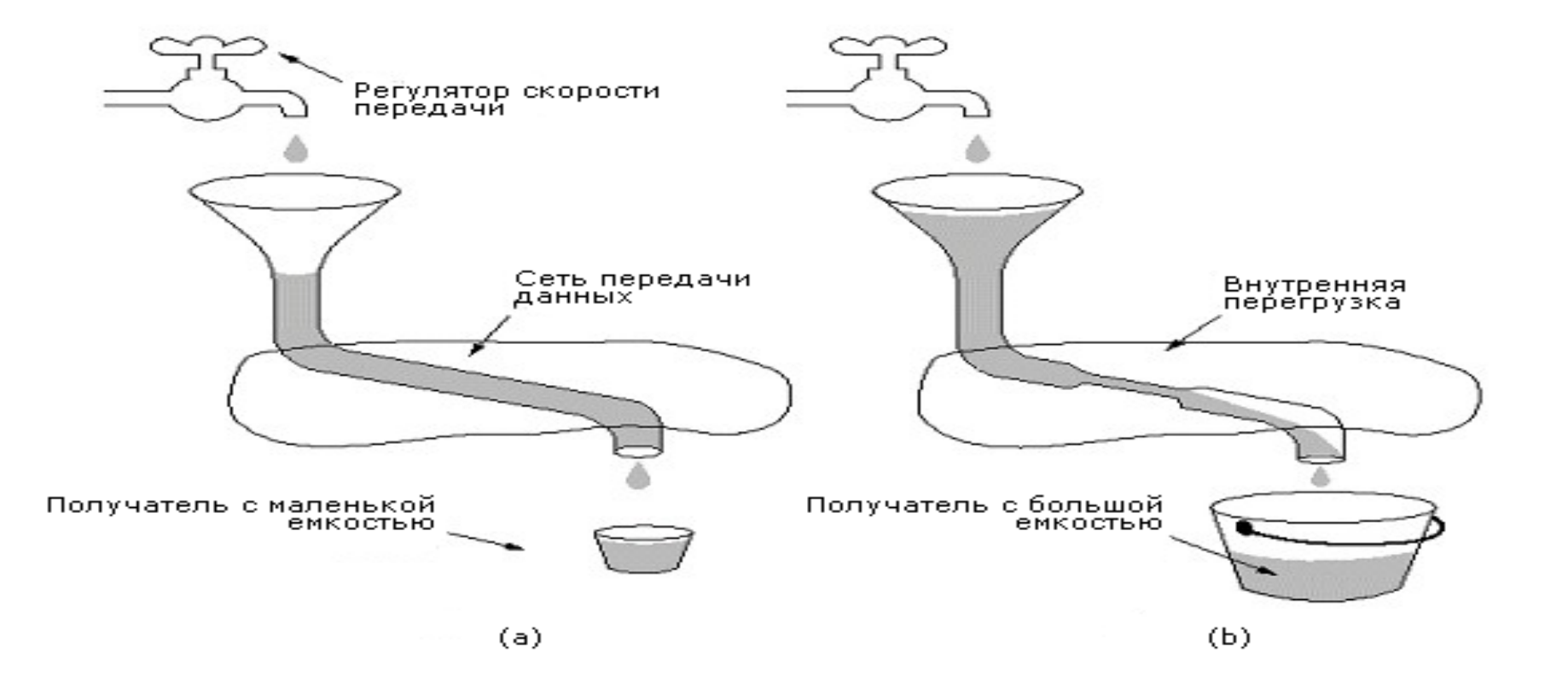
Интернет: перегрузка

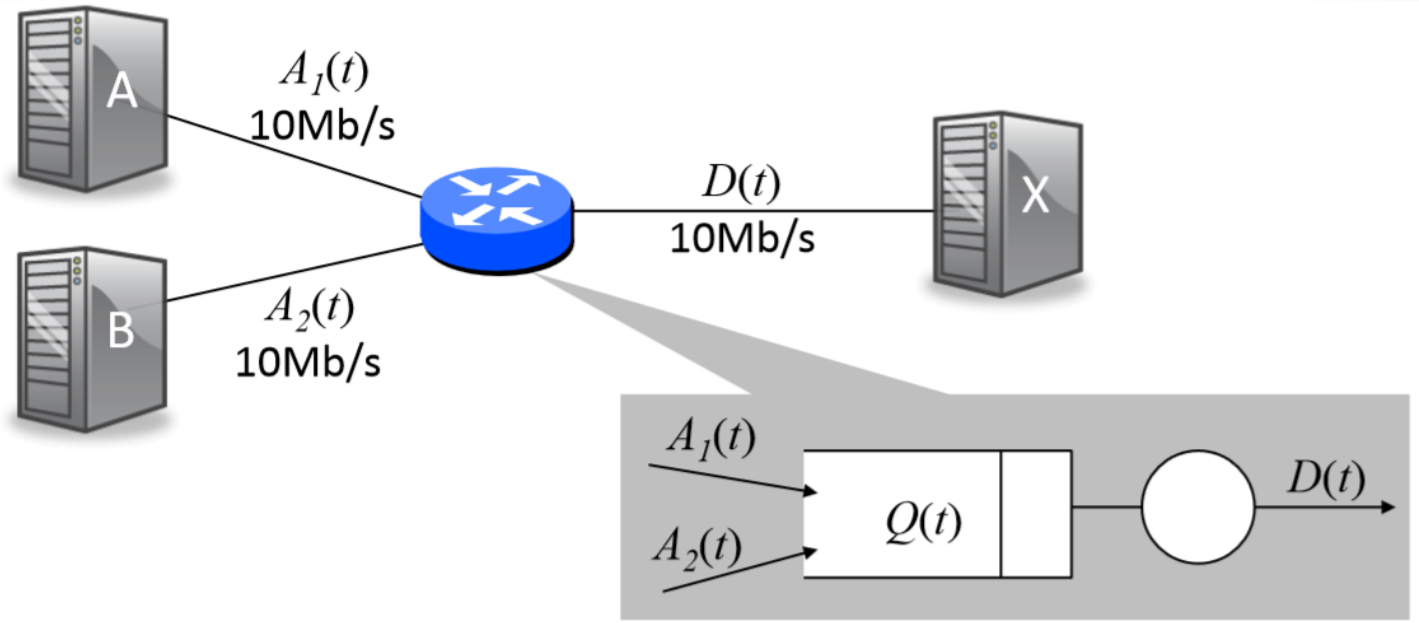
Введение в компьютерные сети

чл.-корр. РАН Смелянский Р.Л.
Кафедра АСВК

Управление потоком и управление перегрузкой



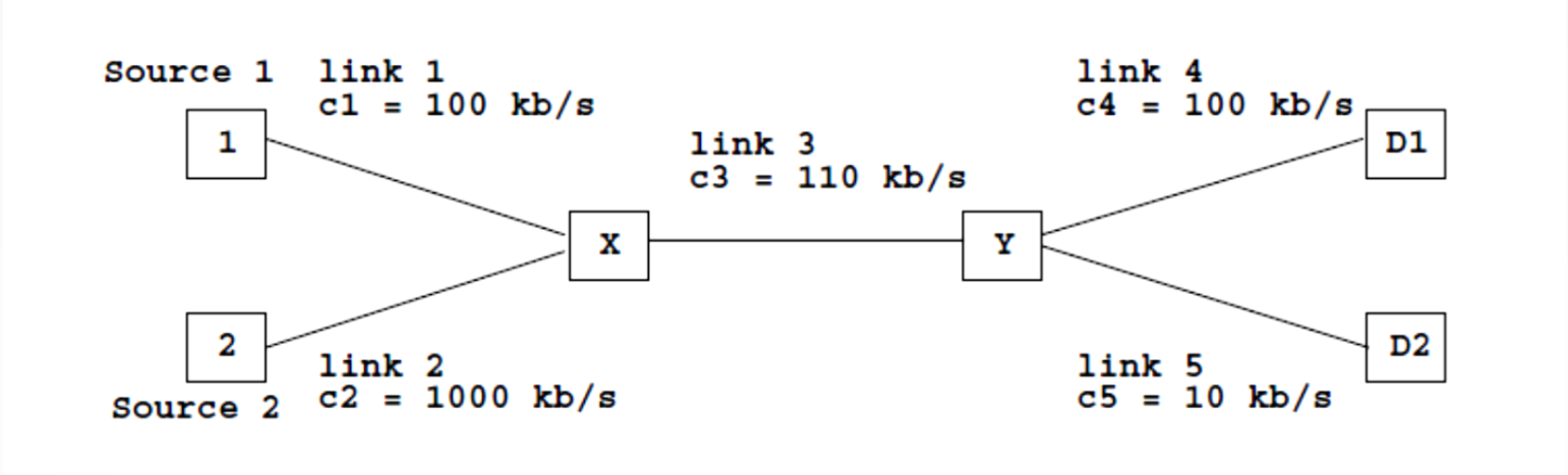
Что вызывает перегрузку?



5

Что вызывает перегрузку?

Источники ничего не знают о распределении пропускных способностей каналов



$\lambda_1 = 100$kb/s $\lambda_2 = 1000$kb/s

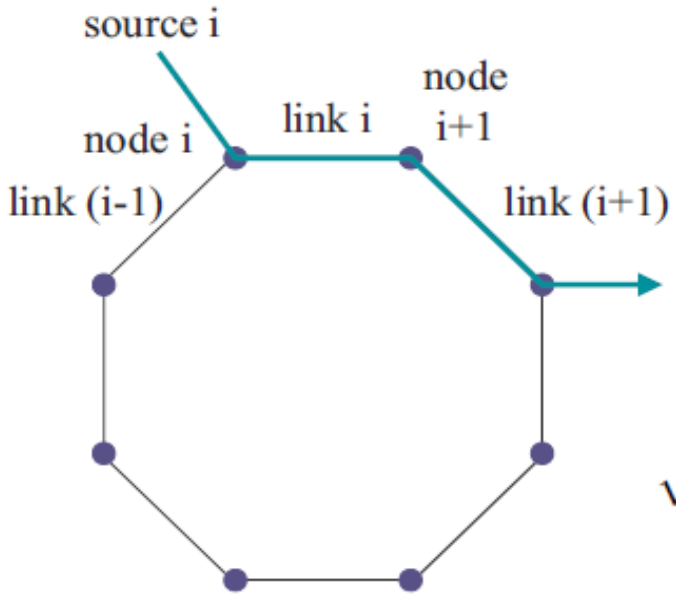
Буфер у X будет переполняться!
Интенсивность трафиков не соответствует распределению пропускных способностей каналов .

Пример

$$\begin{cases} \lambda_i' = \min\left(\lambda_i, \frac{c_i}{\lambda_i+\lambda_{i-1}'}\lambda_i\right) \\ \lambda_i'' = \min\left(\lambda_i', \frac{c_{i+1}}{\lambda_i'+\lambda_{i+1}}\lambda_i'\right) \end{cases}$$

Пусть для любого i

$$\lambda' = \frac{c\lambda}{\lambda+\lambda'} \qquad \lambda'' = \frac{c\lambda'}{\lambda+\lambda'}$$



$$\lambda' = \frac{\lambda}{2}\left(-1+\sqrt{1+4\frac{c}{\lambda}}\right)$$

$$\lambda'' = c - \frac{\lambda}{2}\left(\sqrt{1+4\frac{c}{\lambda}}-1\right)$$

$$\sqrt{1+u} = 1 + \frac{1}{2}u - \frac{1}{8}u^2 + o(u^2)$$

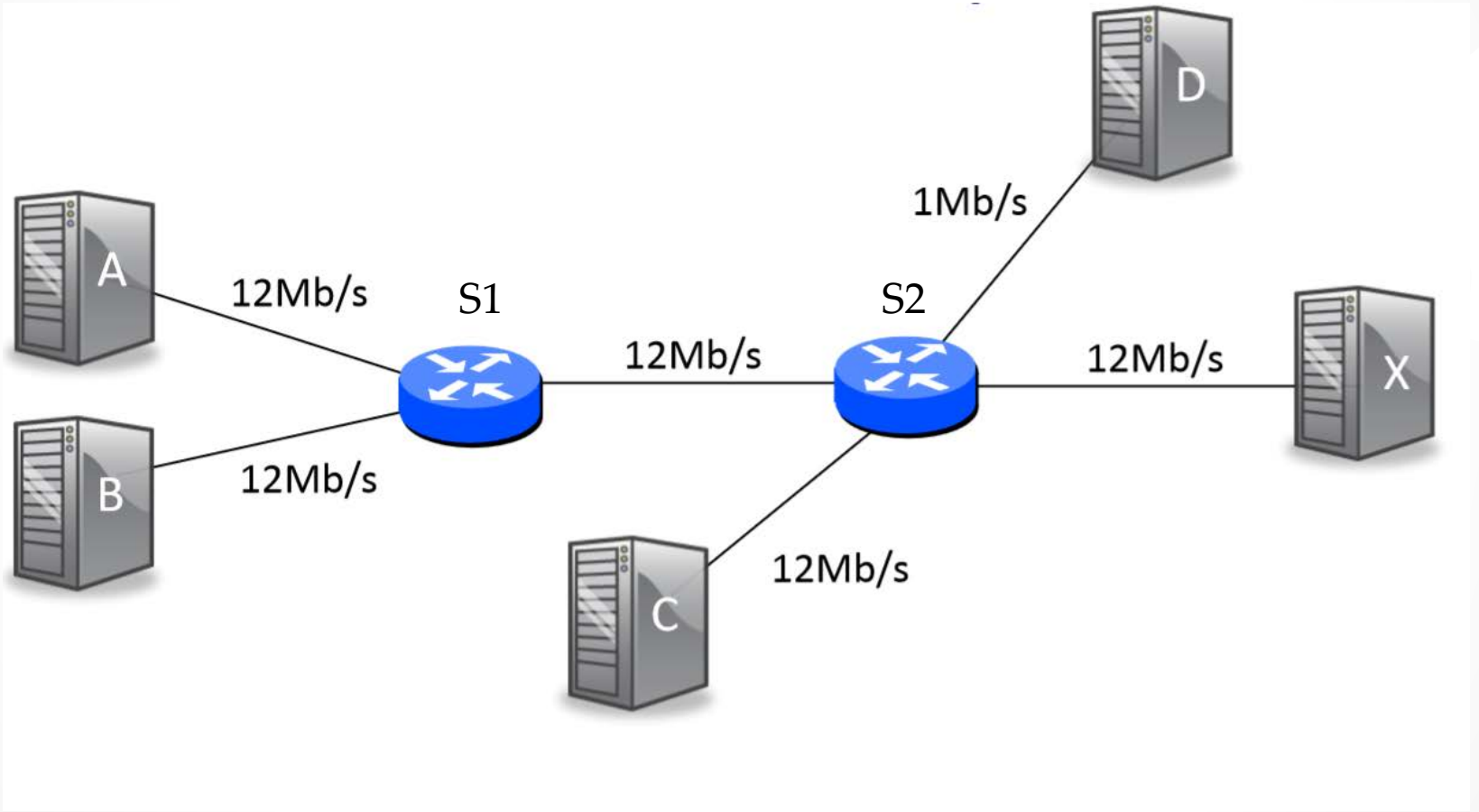
при $u \to 0$

$$\lambda'' = \frac{c^2}{\lambda} + o\left(\frac{1}{\lambda}\right)$$

При λ -> ∞, λ'' -> 0

Вывод: в сети с коммутацией пакетов источник должен регулировать свою скорость вброса пакетов в сеть в зависимости от состояния сети.
В противном случае наступит перегрузка.

Попробуем ограничить источники



Перегрузки неизбежны!

(может быть это и хорошо)

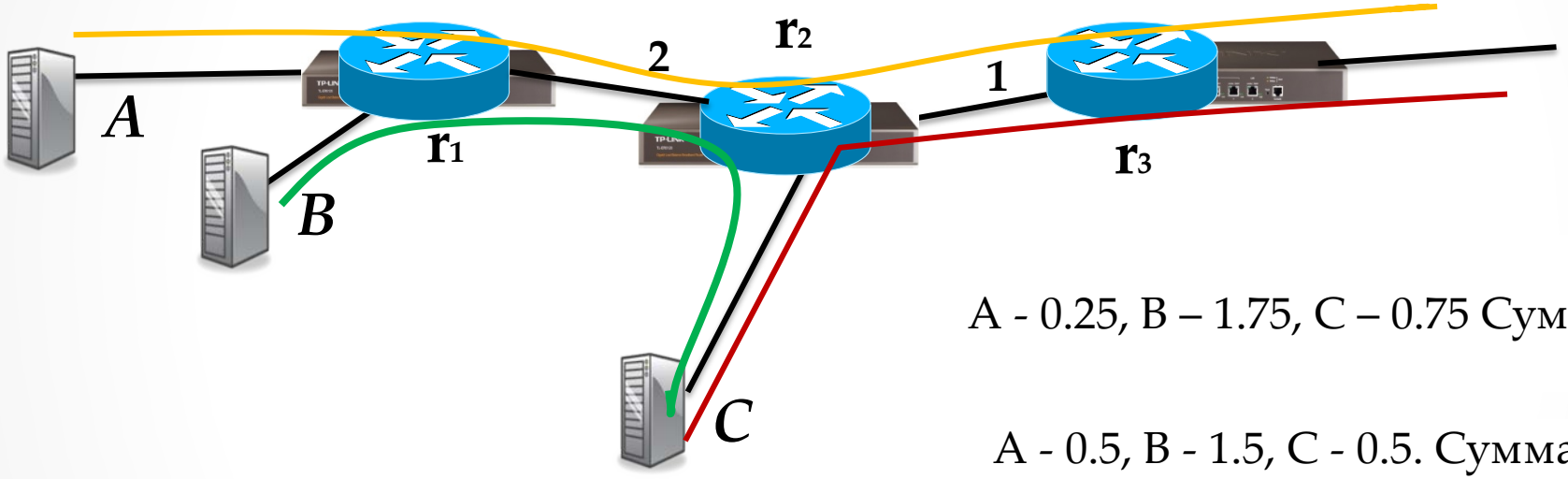
- Коммутацию пакетов используют потому, что она позволяет эффективно использовать пропускную способность каналов. Поэтому буферы в маршрутизаторах часто заполнены.
- Если буферы не заполнены, то задержки малы, но интенсивность использования сети низкая.
- Если буферы постоянно заполнены, задержки возрастают, но интенсивность использования сети также возрастает

Перегрузки неизбежны и даже желательны!

Промежуточный итог

1. Источник должен иметь обратную связь с сетью
2. Перегрузки неизбежны и даже желательны
3. Перегрузки возникают из-за несбалансированности распределения ресурсов
4. Когда пакет сброшен, то все ресурсы, которые были потрачены до того чтобы его доставить к месту сброса, потрачены зря
5. Если пакет был сброшен, то его ретрансмиссия может усугубить перегрузку
6. Для распределения пропускной способности перегруженного канала необходимо ввести понятие справедливости, чтобы решить как потоки будут разделять ресурсы этого канала

Понятие справедливости



A - 0.25, B – 1.75, C – 0.75 Суммарно = 2.75

A - 0.5, B - 1.5, C - 0.5. Суммарно - 2.5

Здесь и A и C на $r_2 r_3$ по 0.5

Что такое справедливость и как ее измерить ?

Max-min справедливость

Определение:

Распределение ***max-min справедливо*** если нельзя увеличить скорость какого-нибудь потока, не понизив скорости другого, потока с меньшей скоростью

A - 0.25, B – 1.75, C – 0.75
Суммарно = 2.75

A - 0.5, B - 1.5, C - 0.5. Суммарно - 2.5
Здесь и A и C на r2r3 по 0.5

Необходимое и достаточное условие min-max справедливости

Пусть есть:

- $s = 1, \ldots, S$ - *множество источников*
- $l = 1, \ldots, L$ - *множество линий*
- $A_{l,s}$ – *доля потока от s на линии l*
- $\{c_i\}_{i=1}^{L}$ - пропускная способность c_i

Модель сети $M = (\boldsymbol{x}, A)$, где

$\boldsymbol{x}$ – распределение потоков от s (вектор),

A – матрица S*L

Распределение потоков допустимо

- $\forall s: 1 \le s \le S \Rightarrow x_s \ge 0$
- $\forall l: 1 \div L: \ \sum_{i=1}^{S} A_{l,i}\, x_i \le c_l$

Линия l – ***насыщена*** *если* $c_l = \sum_{i=1}^{S} A_{l,i}\, x_i$

Линия l – ***критична*** *для s тогда и только тогда*

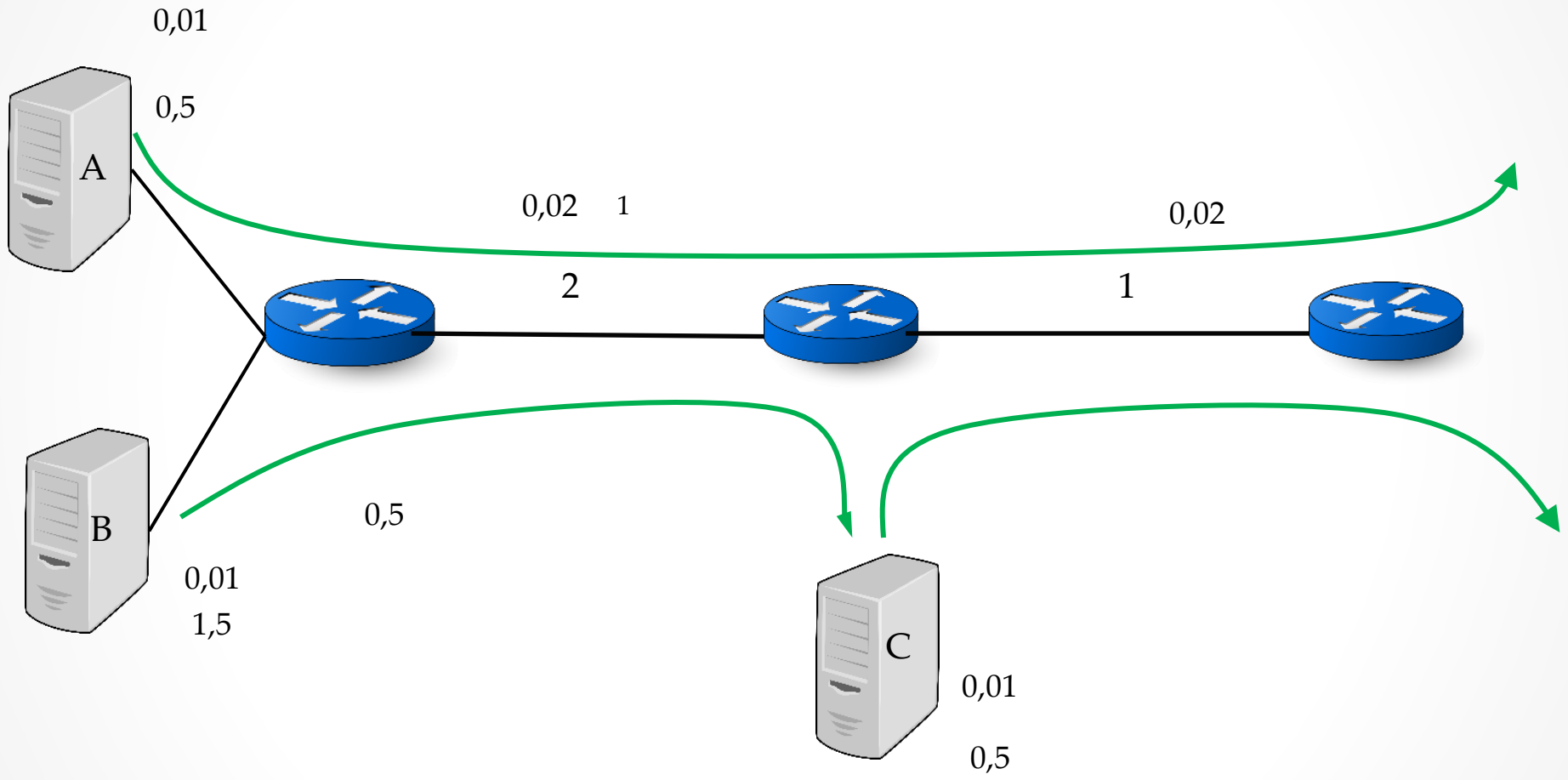
- *l – насыщена*
- *s имеет максимальный поток среди всех источников, использующих l:*
- $\forall\, s': A_{l,s} \ge 0 \ \rightarrow \ x_s \ge x_{s'}$

Определение: x является max-min распределением, если

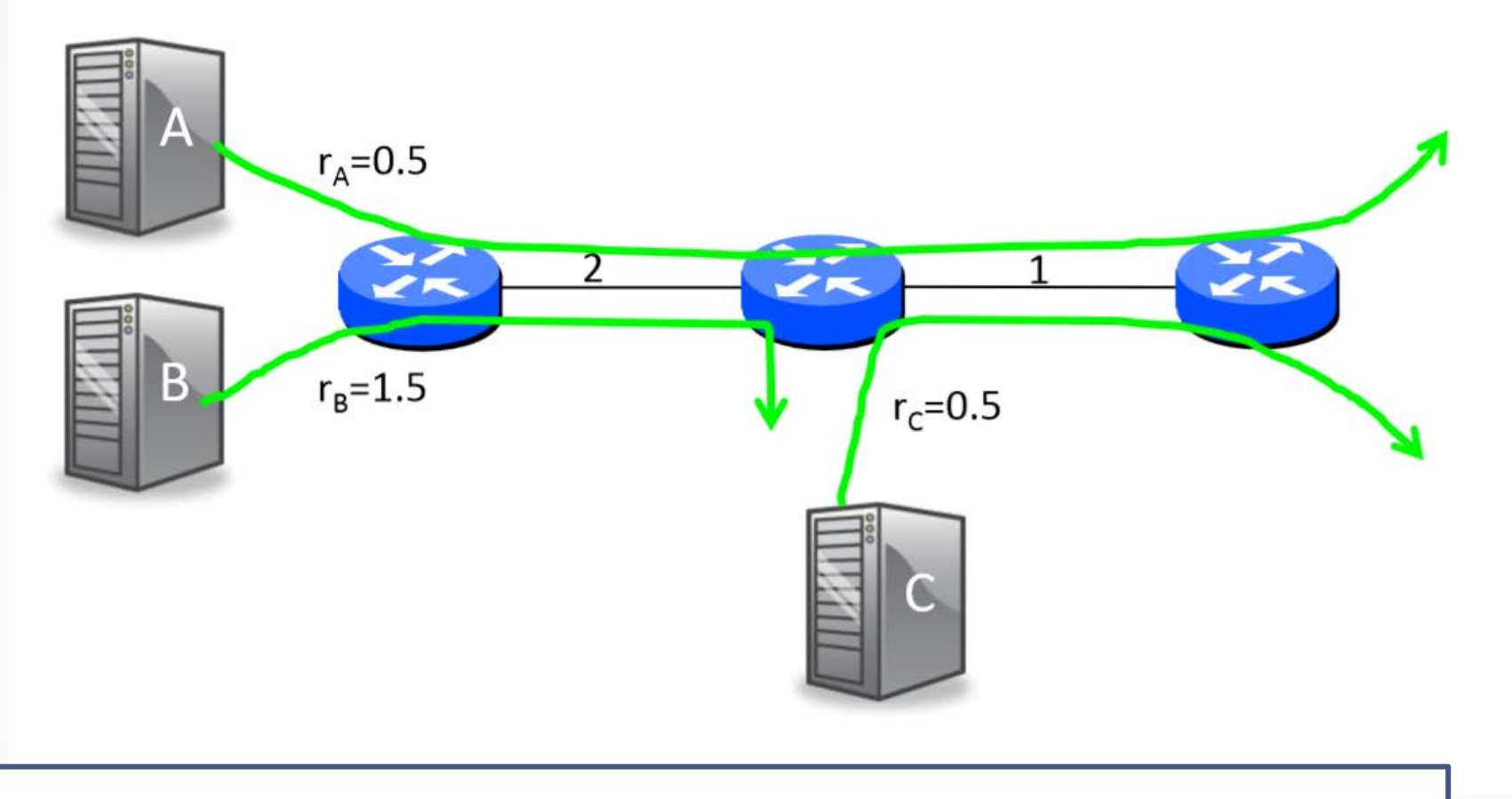
1. x допустимое распределение потоков
2. $\forall$ ***y - допустимое:*** $\exists s: y_s > x_s$ *то* $\exists\, s': \forall s: (s \ne s') \,\&\, (x_{s'} \le x_s) \,\&\, (y_{s'} < x_{s'})$

Теорема 1: x *есть max-min распределение потоков тогда и только тогда когда у каждого источника есть критичная линия*

Алгоритм построения max-min распределения (постепенного заполнения)



Max-min справедливое распределение



Если max-min справедливое распределение существует, то оно единственное для заданной топологии.

Где и как управлять перегрузкой?

Введение в компьютерные сети

чл.-корр. РАН Смелянский Р.Л.
Кафедра АСВК ф-т ВМК МГУ

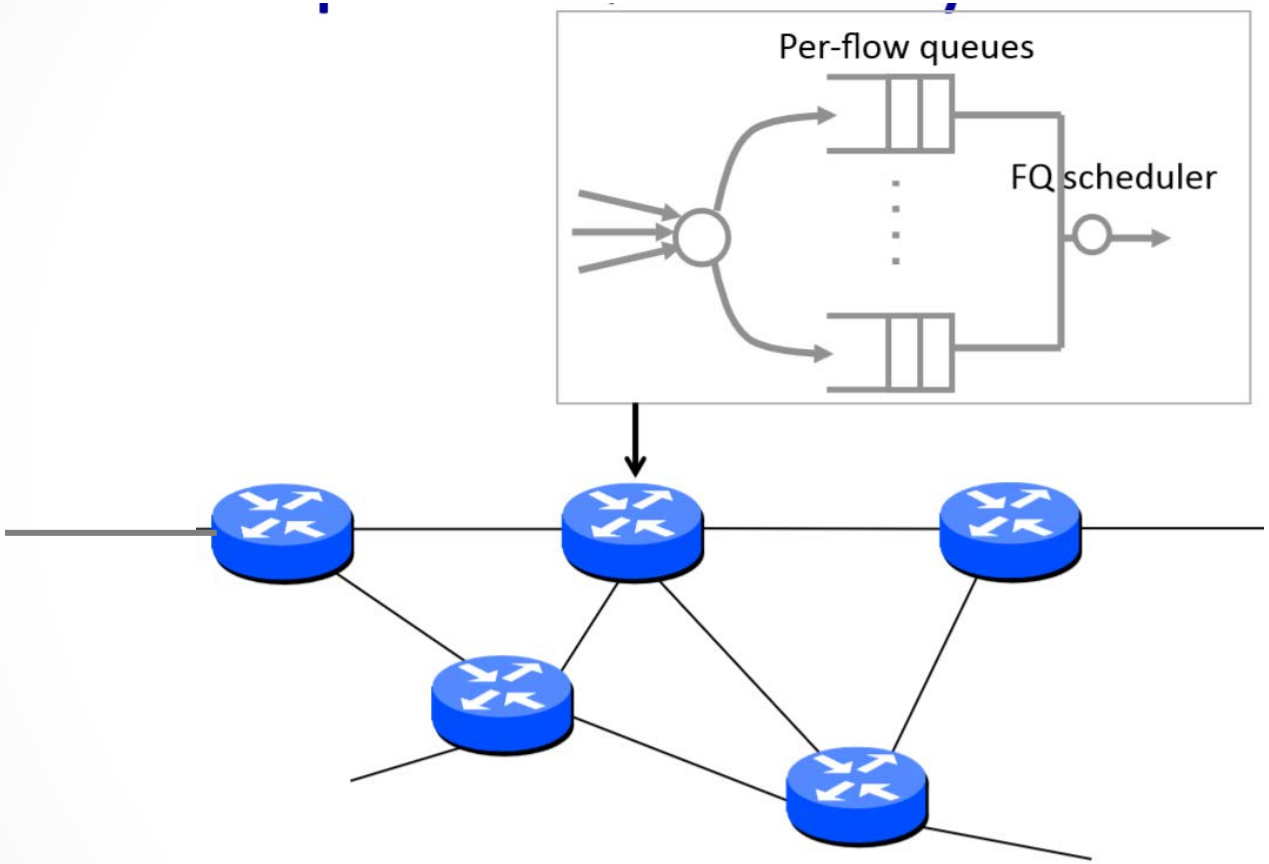
План

Мы хотим построить алгоритм управления перегрузками такой, чтобы обеспечить:

1. **Высокую пропускную способность**: каналы загружены, скорость потоков высокая
2. **Быстрая реакция на изменения** состояния сети (возникновение новых потоков)

- **Где надо размещать управление перегрузкой?**
  - В сети каждом маршрутизаторе (WFQ)
  - На каждом хосте
- Скользящее окно и AIMD

Пример: FQ на каждом маршрутизаторе



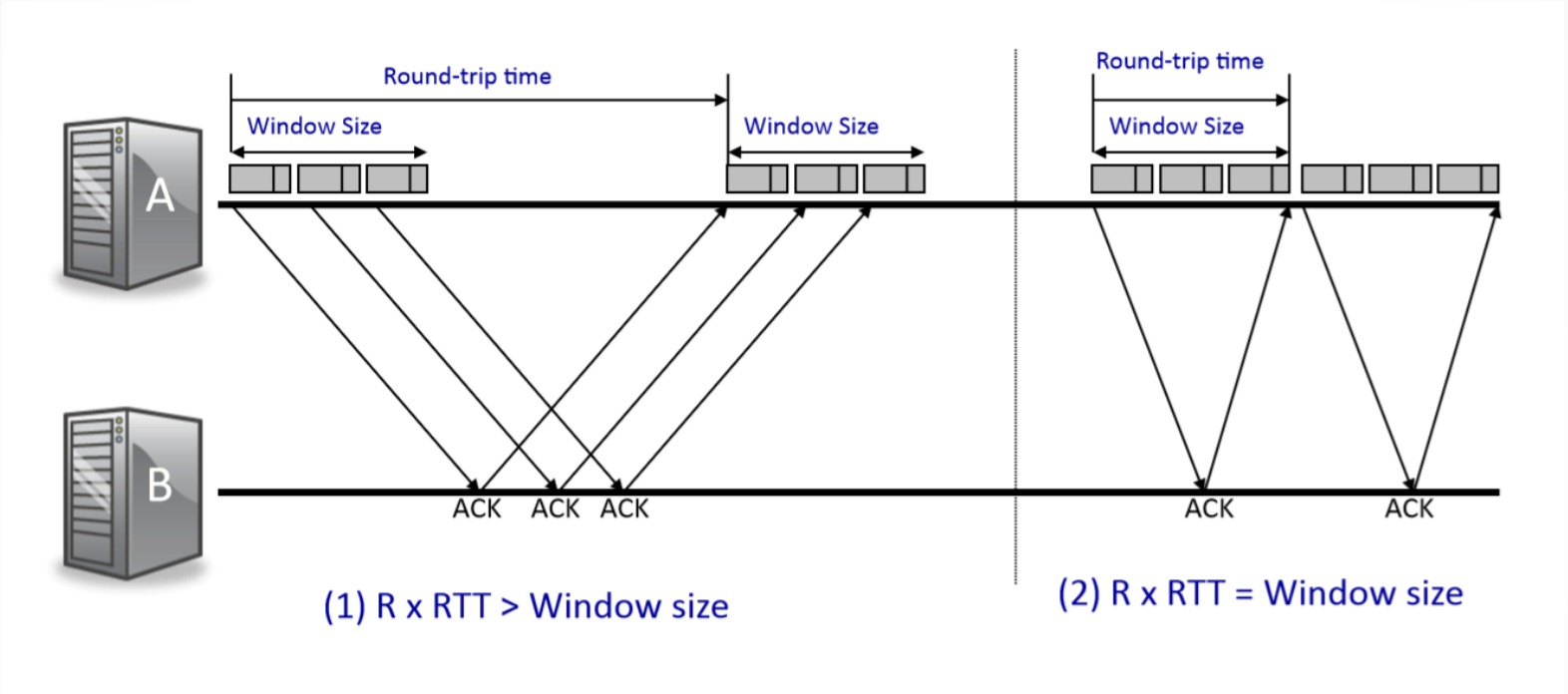
Управление перегрузками в TCP

(управление на хостах)

В TCP управление перегрузкой размещается на конечном хосте

- Реакция на события, наблюдаемые на конечном хосте (например, потеря пакета).
- Использование скользящего окна, предназначенного для управления потоком в TCP
- Постараться оценить сколько пакетов можно безопасно отправить в сеть одновременно.

Скользящее окно в TCP



Скользящее окно перегрузки в TCP

TCP варьирует число пакетов отправляемых в сеть, изменяя размер скользящего окна:

размер окна=min{ Объявленное окно, Окно перегрузки }

получатель — отправитель (cwnd)

Как определить размер cwnd?

AIMD управление перегрузкой для одного потока

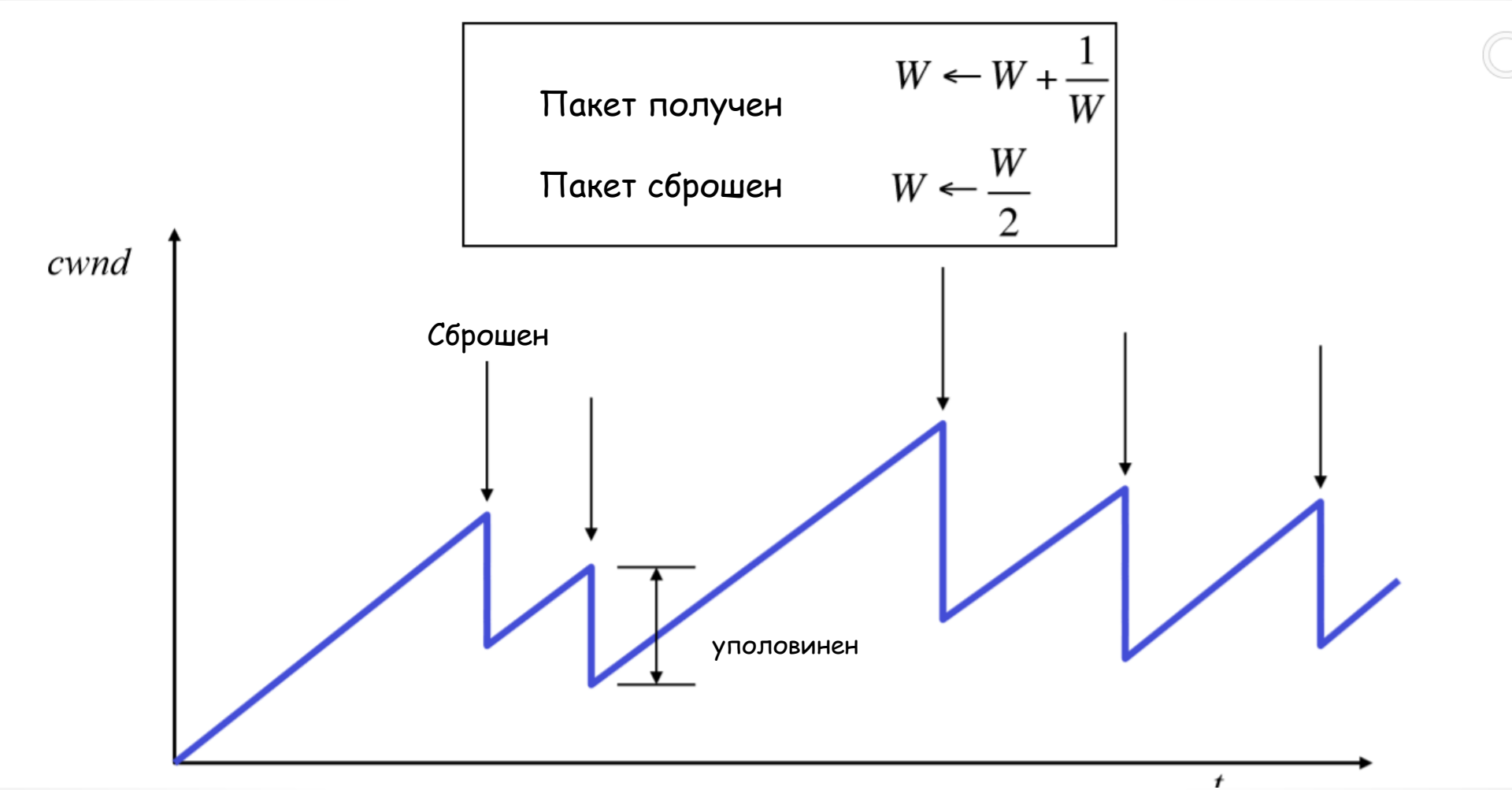
Введение в компьютерные сети

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

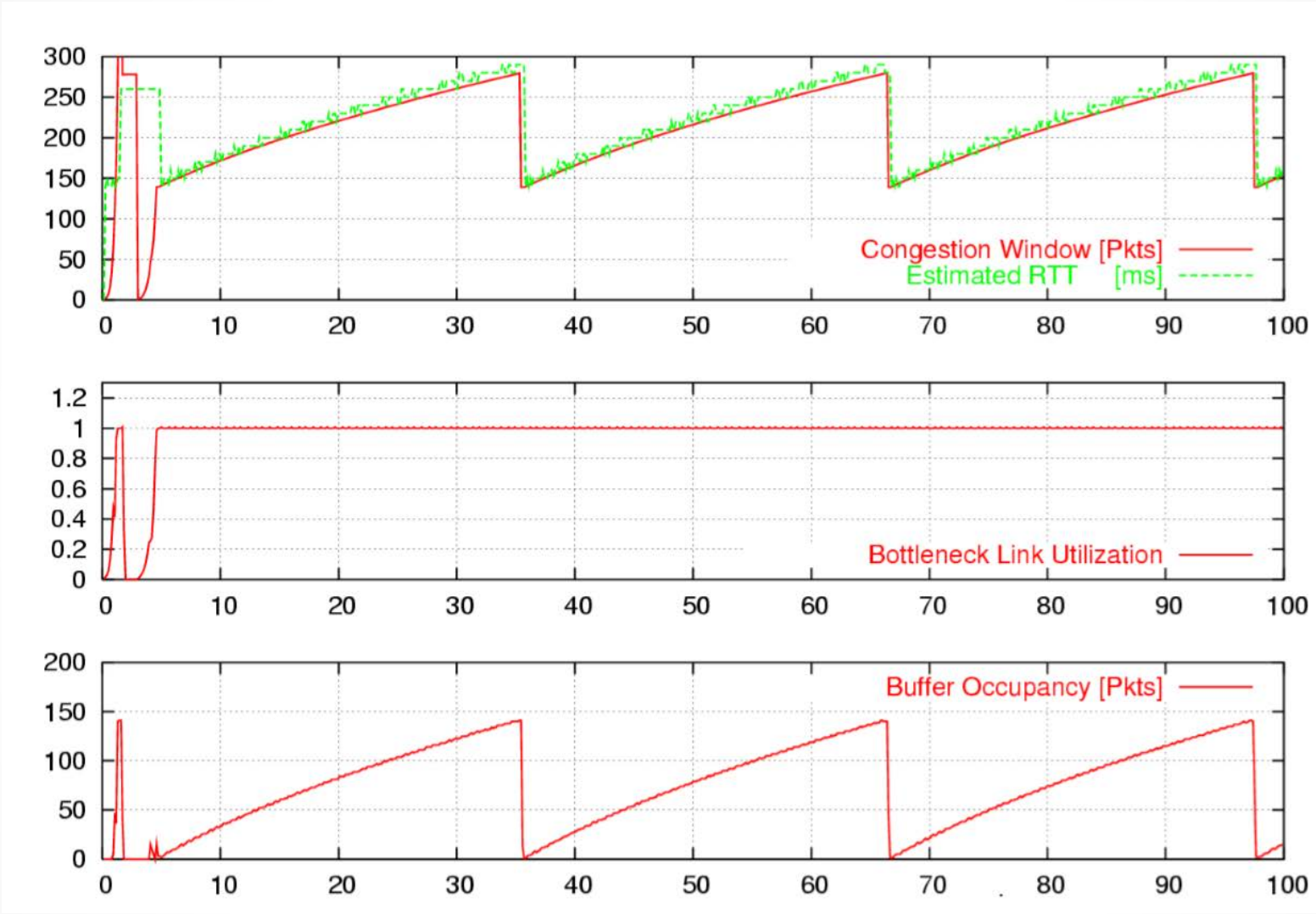
AIMD
(Additive Increase Multiple Decrease)

- Если пакет получен успешно: $W \leftarrow W + \frac{1}{W}$
- Если пакет был сброшен: $W \leftarrow \frac{W}{2}$

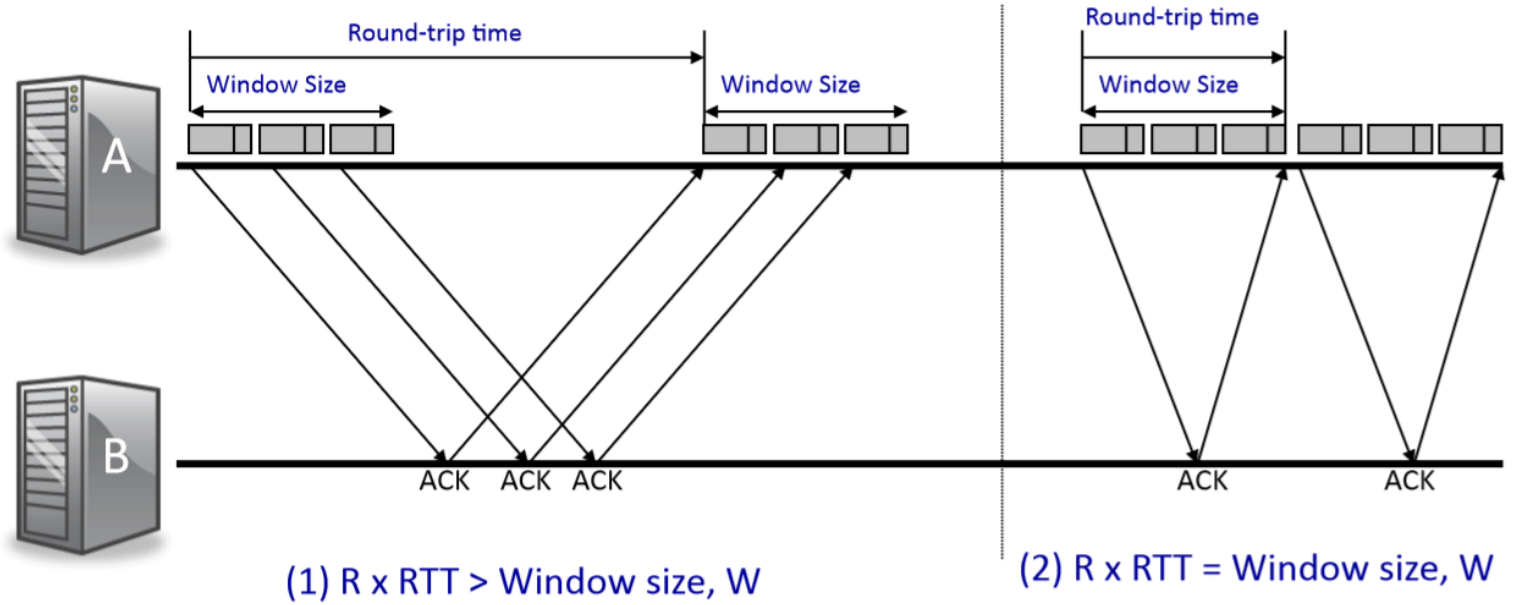
Пила AIMD


Пакет получен
$W \leftarrow W + \frac{1}{W}$
Пакет сброшен
$W \leftarrow \frac{W}{2}$
cwnd
Сброшен
уполовинен
t

Примеры динамики одиночного потока

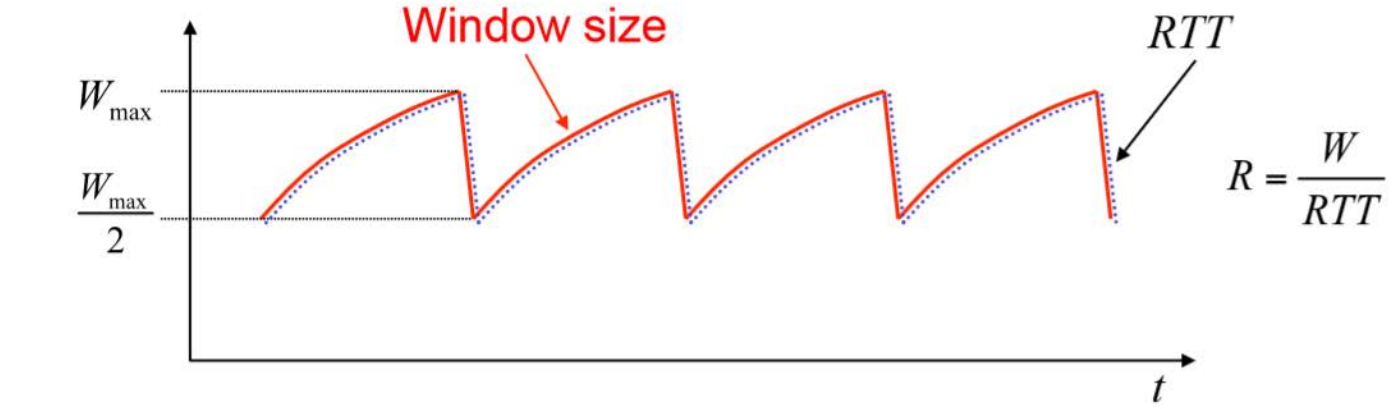


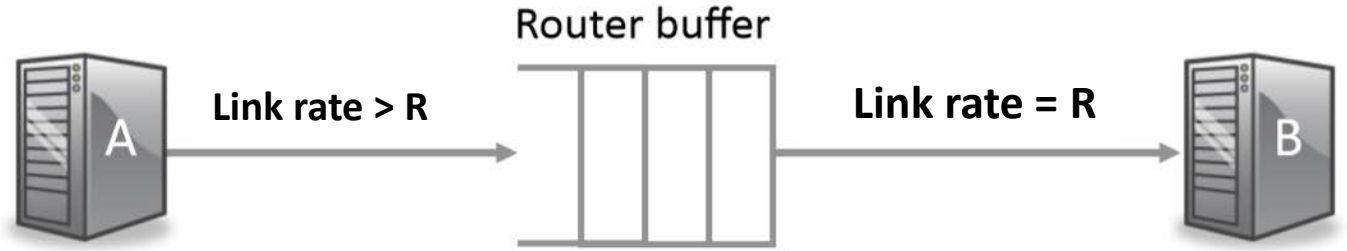
Скорость отправки для одиночного потока



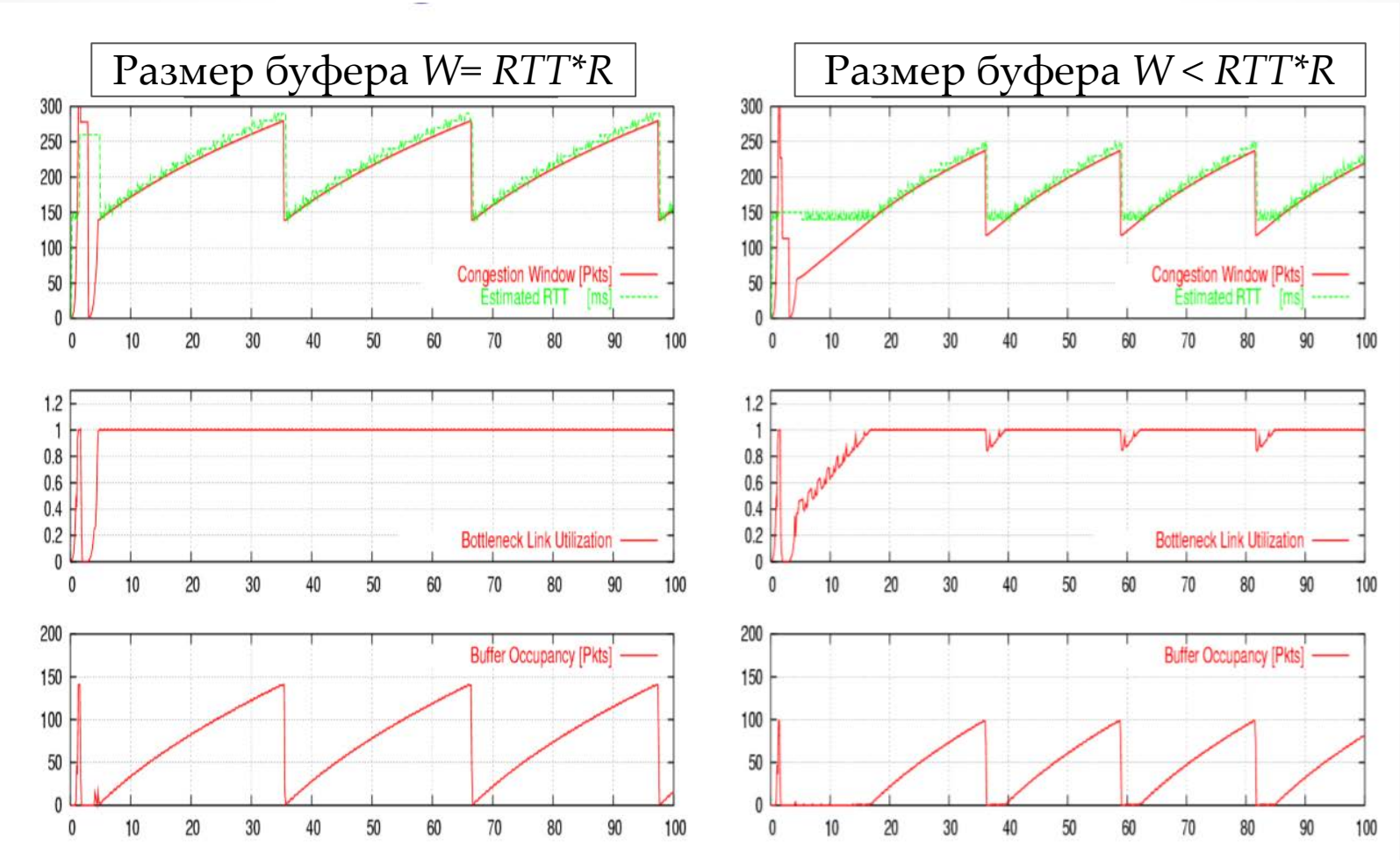
$$R = \frac{W}{RTT}$$

Скорость отправки для одиночного потока





Насколько большим должен быть буфер?



Промежуточные выводы

В TCP управление перегрузкой располагается на хосте

- Реакция на события, наблюдаемые на конечном хосте (например, потеря пакета).
- Использование скользящего окна, предназначенного для управления потоком в TCP
- Стараться как можно быстрее оценить сколько пакетов можно безопасно отправить в сеть одновременно.
- Изменять размер окна в соответствии с алгоритмом AIMD

Комментарии для одиночного потока

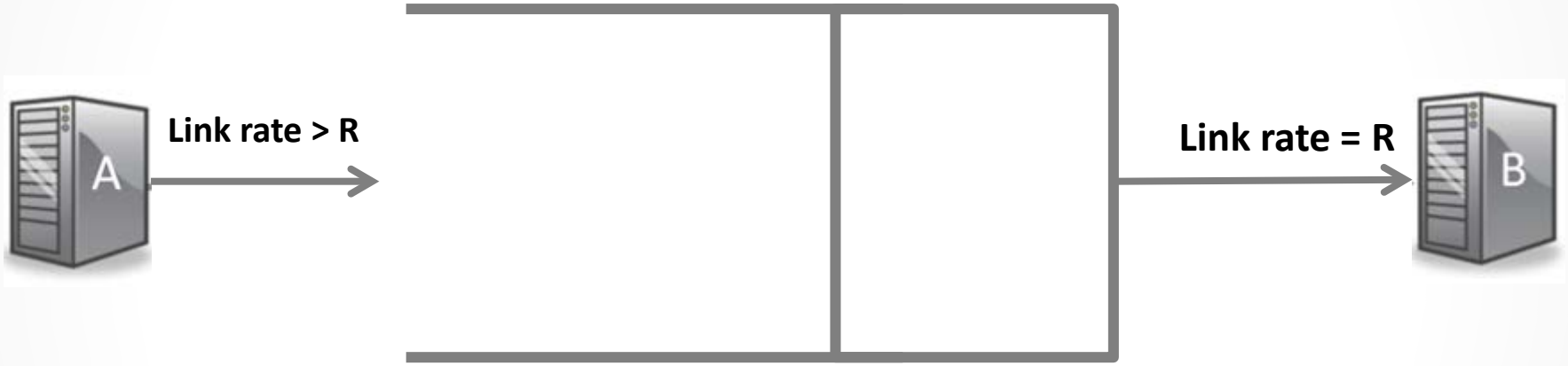
1. Окно увеличивают, сокращают в соответствии с AIMD
2. … пробировать как много байт канал еще может вместить
3. Пилообразное поведение – нормальная форма динамики
4. Скорость отправки постоянная
5. Размер буферного пространства определяет соотношение – RTT x R

Управление перегрузкой: AIMD с несколькими потоками

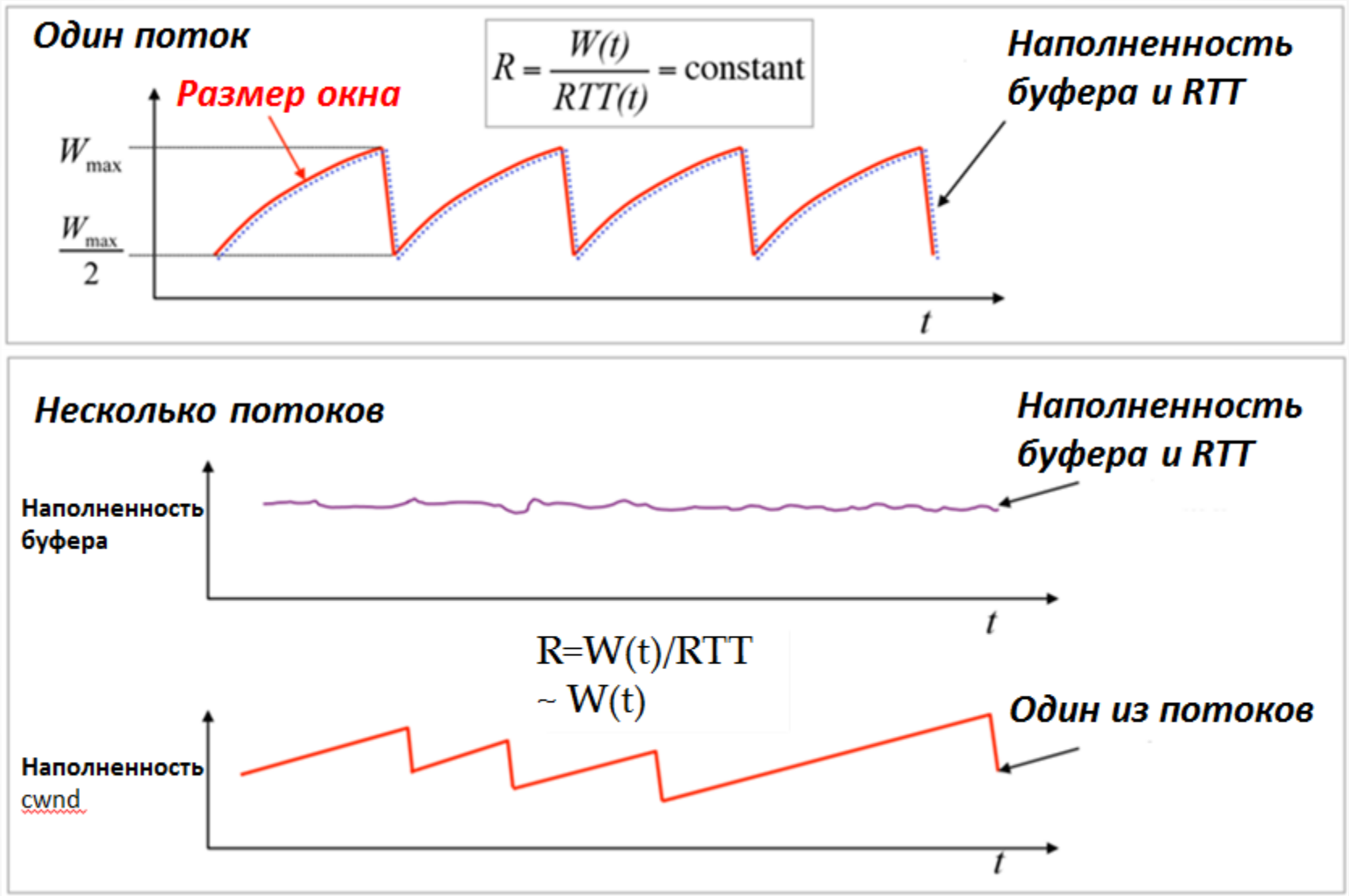
Введение в компьютерные сети

чл.-корр. РАН Смелянский Р.Л.
Кафедра АСВК ф-т ВМК МГУ

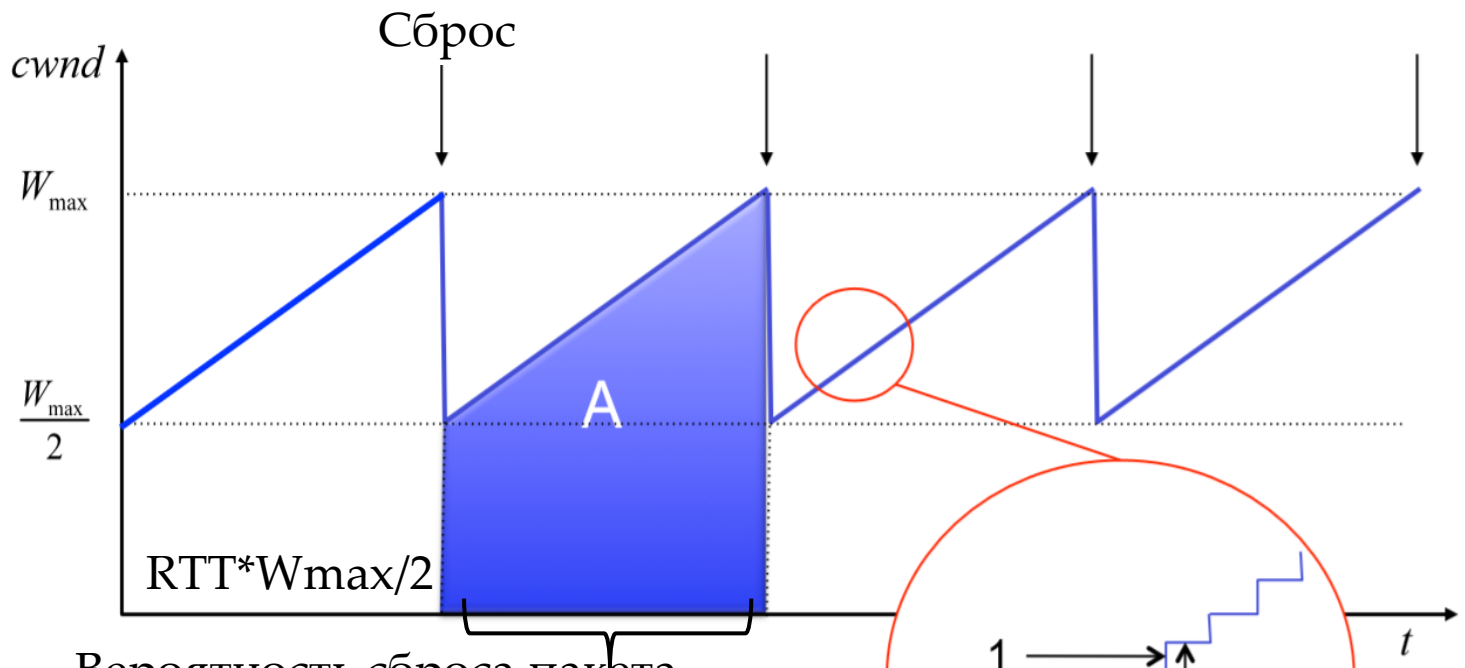
Буфер маршрутизатора



Один поток vs много потоков



Зависимость скорости потока от RTT и вероятности сброса пакета



Вероятность сброса пакета

$p \approx 1/A$, где $A = \frac{3}{8} W^2$

Пропускная способность

$$R = \frac{A}{\left(\frac{W_{max}}{2}\right) RTT} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{1}{RTT\sqrt{p}}$$

Интерпретация уравнения скорости

$$R = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{1}{RTT\sqrt{p}}$$

$$RTT \to 0 \Rightarrow R \to \infty$$

$$p \to 0 \Rightarrow R \to \infty$$

$$\frac{R1}{R2} = \sqrt[2]{\frac{p_2}{p_1}}$$

Комментарии для нескольких потоков

1. Окно увеличивают/сокращают в соответствии с AIMD
2. … пробировать как много байт канал еще может вместить
3. В «узком месте» будут скапливаться пакеты разных потоков
4. Скорость отправки меняется в зависимости от размера окна
5. AIMD очень чувствителен к вероятности потери пакетов
6. AIMD ущемляет потоки с большим RTT

Заключение:

Управление перегрузками в TCP

В TCP управление перегрузкой размещается на конечном хосте

- Реакция на события, наблюдаемые на конечном хосте (например, потеря пакета).
- Использование скользящего окна, предназначенного для управления потоком в TCP
- Механизм AIMD позволяет оперативно оценить сколько пакетов можно безопасно отправить в сеть одновременно.

Реализация управления перегрузкой на практике
(базовые алгоритмы)

Введение в компьютерные сети
чл.-корр. РАН Смелянский Р.Л.
Кафедра АСВК

Три основных вопроса

1. *Когда следует посылать новые данные?*
2. *Когда следует посылать данные повторно?*
3. *Когда надо отправлять подтверждения?*

TCP Pre-Tahoe

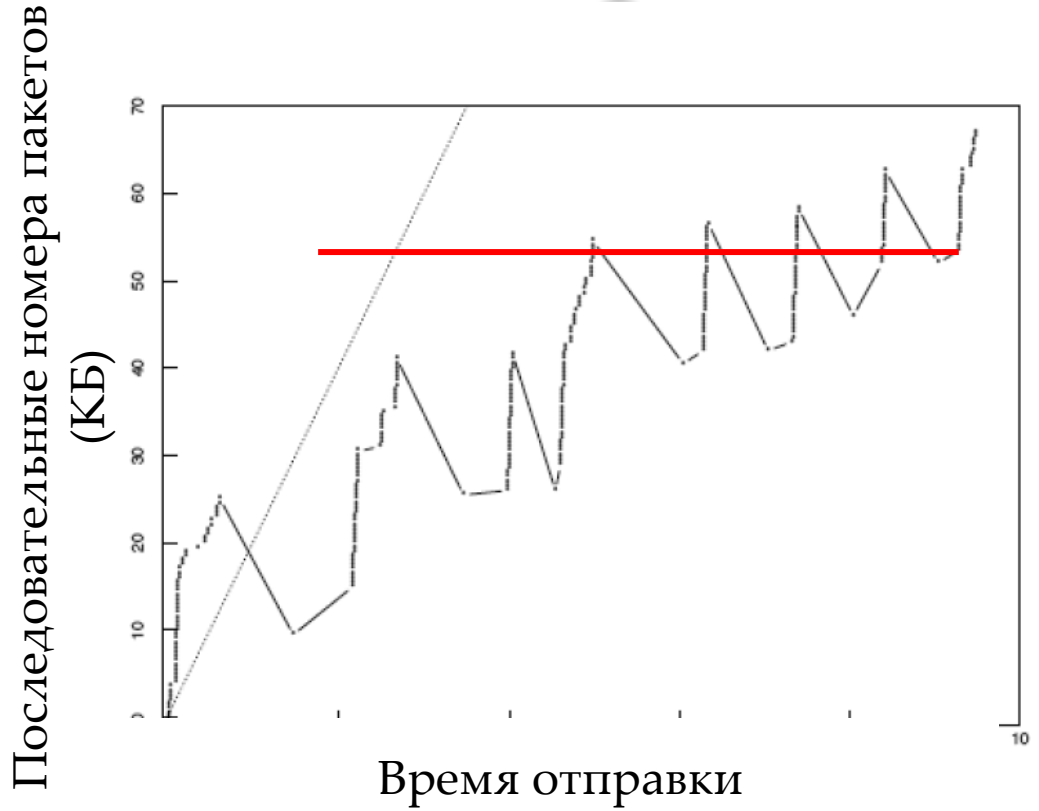
Немного истории

- *1983 – ARPA переходит на TCP/IP*
- *1986 - Интернет страдает от перегрузок*
- *1987 - Ван Якобсон предлагает TCP Tahoe*
- *1990 – Добавляются режимы быстрого восстановления и быстрой повторной передачи (Reno)*

TCP Pre-Tahoe

- *Получатель устанавливает размер окна управления потоком (размер скользящего окна)*
- *Отправитель шлет пакеты, число которых полностью соответствует размеру скользящего окна*
- *На каждый пакет устанавливают таймер*
- *Проблема: что будет если размер окна превышает пропускную способность сети?*

TCP образца 1986



Переотправка одного пакета 4 раза!

Рисунок из статья ван Якобсона и Карела

TCP Tahoe

Три усовершенствования TCP

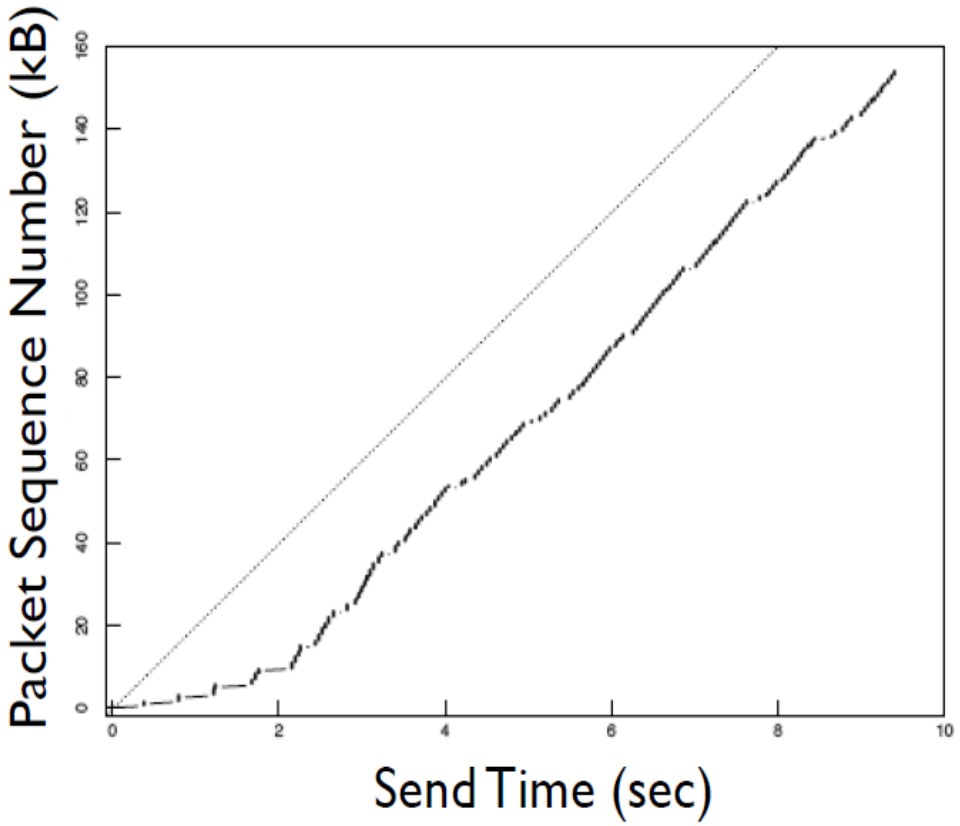
- *Окно перегрузки (CWND)*
- *Оценка Time_out*
- *Саморегулирование (Self-clocking)*

Окно перегрузки (TCP Tahoe)

- Отправитель
  - узнает от получателя FCWND (Flow Control WND – окно управления потоком)
  - оценивает размер CWND
- Окно отправителя = min (FCWND,CWND)
- Разделение фазы управления перегрузкой на две
- Медленный старт
- Предотвращение перегрузки - стабилизация

Медленный старт

- *Медленный старт*
- *CWND = MSS*
- *На каждый ACK увеличиваем окно на MSS*
- *Экспоненциально увеличиваем (удваиваем) размер окна перегрузки, прощупывая возможность сети*
- *«медленный» по сравнению с изначальным алгоритмом*

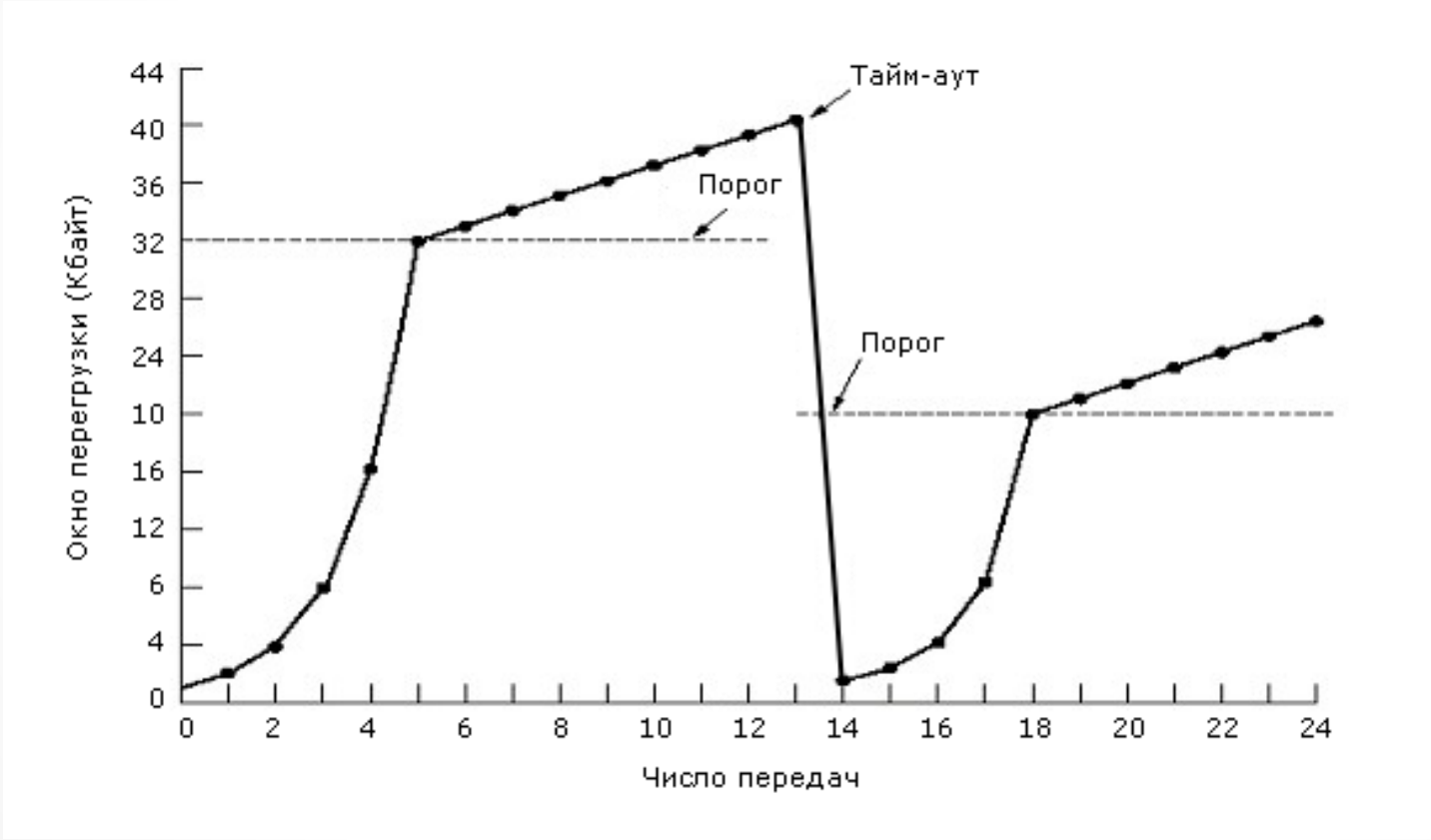


Предотвращение перегрузки

- *Медленный старт (slow start)*
  - *Увеличиваем CWND на MSS на каждое подтверждение*
  - *Экспоненциальный рост (за RTT удваиваем cwnd) пока не достигнем порога (cwnd/2 в предыдущей фазе предотвращения перегрузки) или не обнаружим перегрузку*

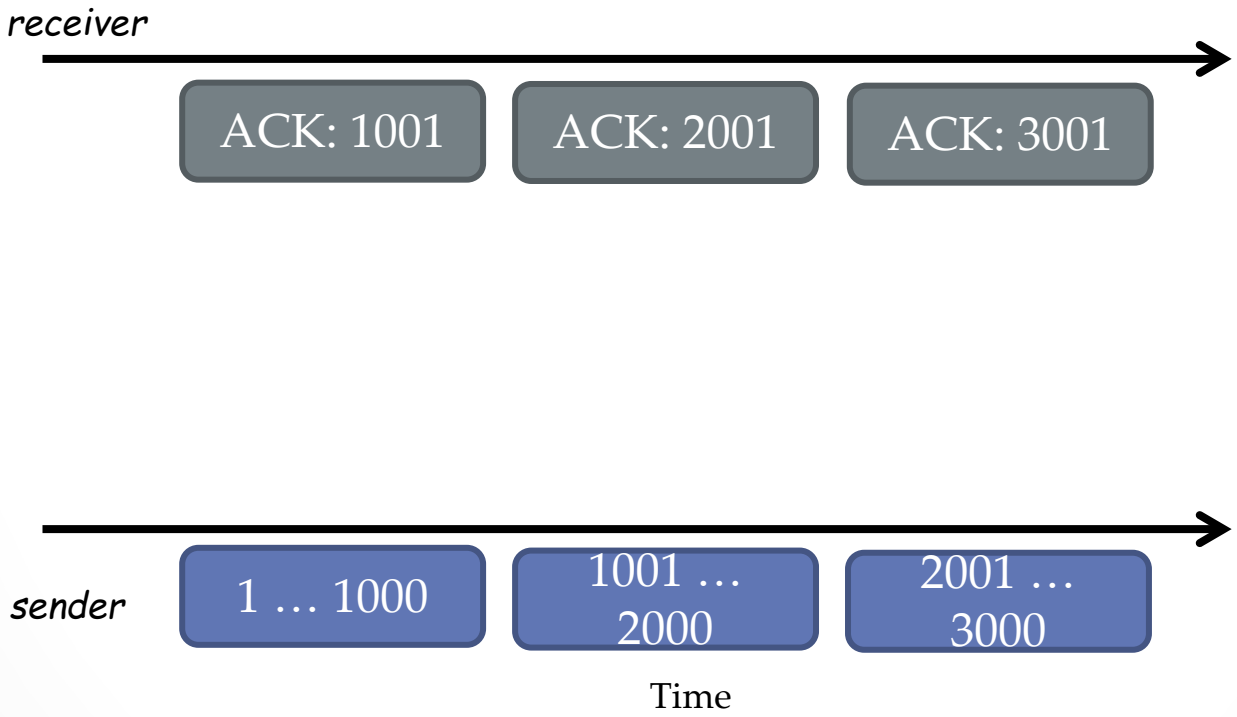
- *Предотвращение перегрузки (congestion avoidance)*
  - *Увеличиваем окно перегрузки только на MSS^2/CWND при каждом подтверждении*
  - *За каждый RTT (cwnd/MSS) увеличиваем cwnd на MSS*
  - *Линейный рост*

Пример управления перегрузками



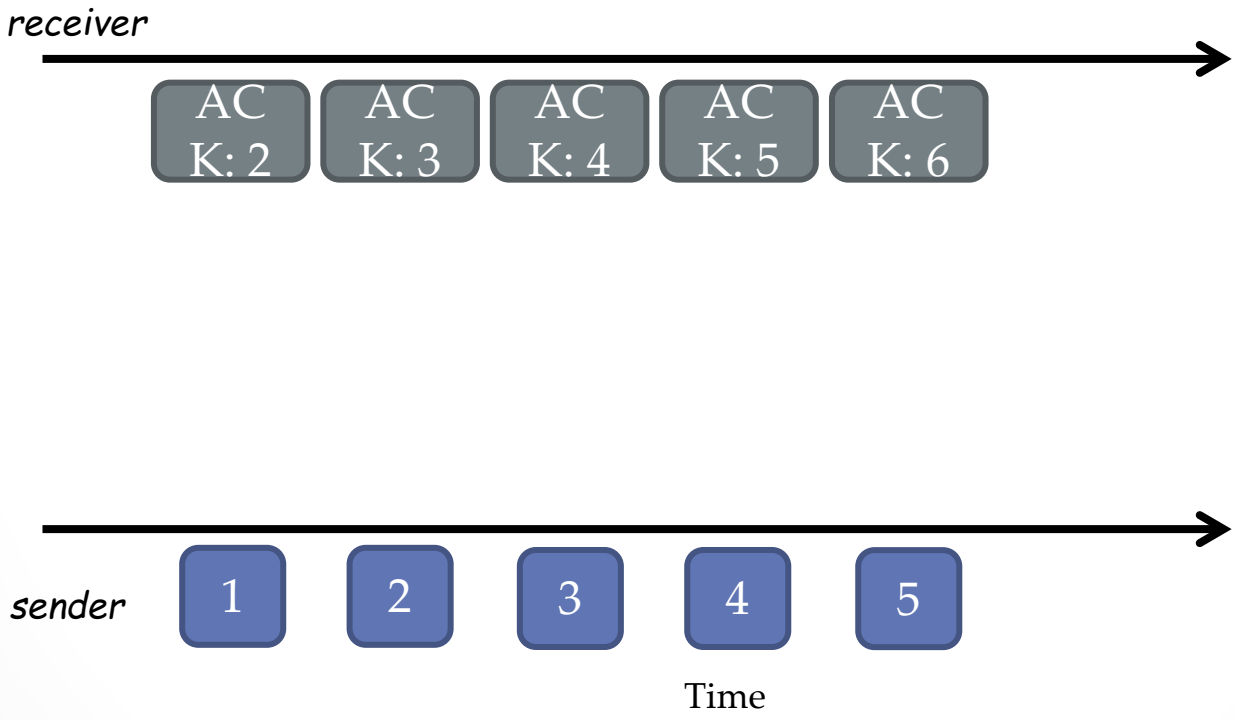
Механизм подтверждений

- *В подтверждении содержится номер следующего ожидаемого байта*



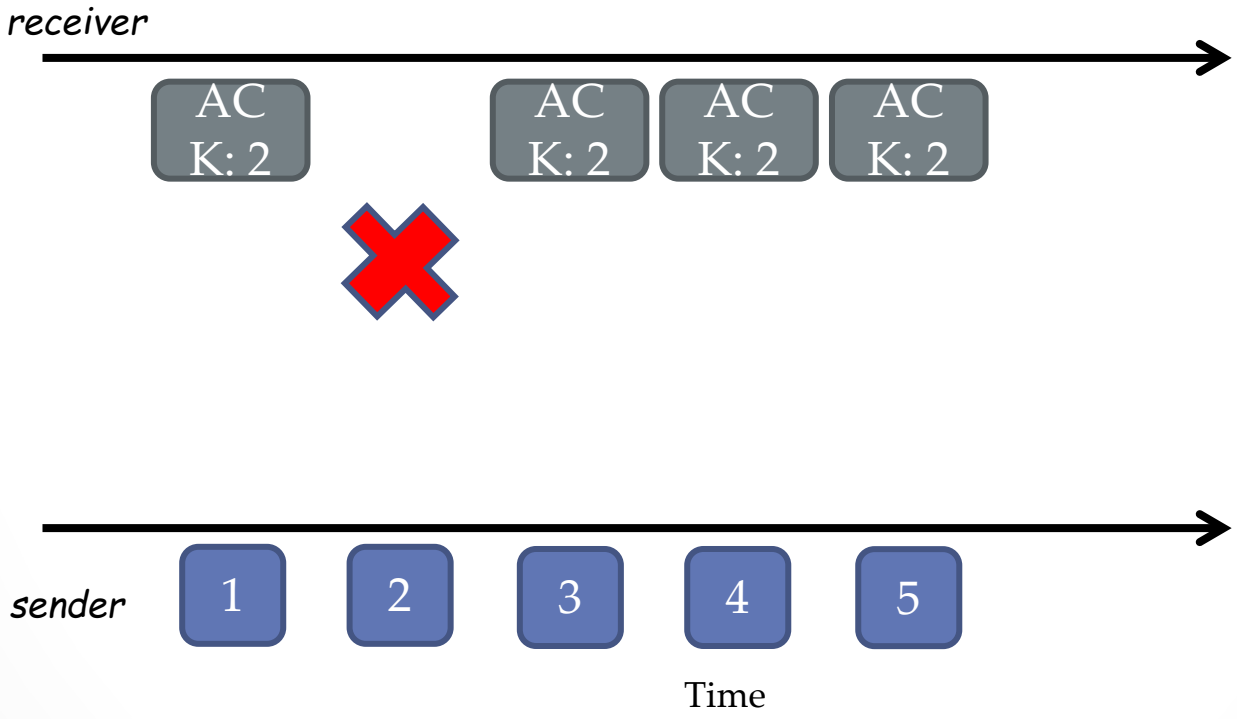
Механизм подтверждений

- *Для упрощения будем говорить не о байтах, а о пакетах.*



Механизм подтверждений

- *При потере пакета появляются повторные подтверждения (duplicate ACK)*



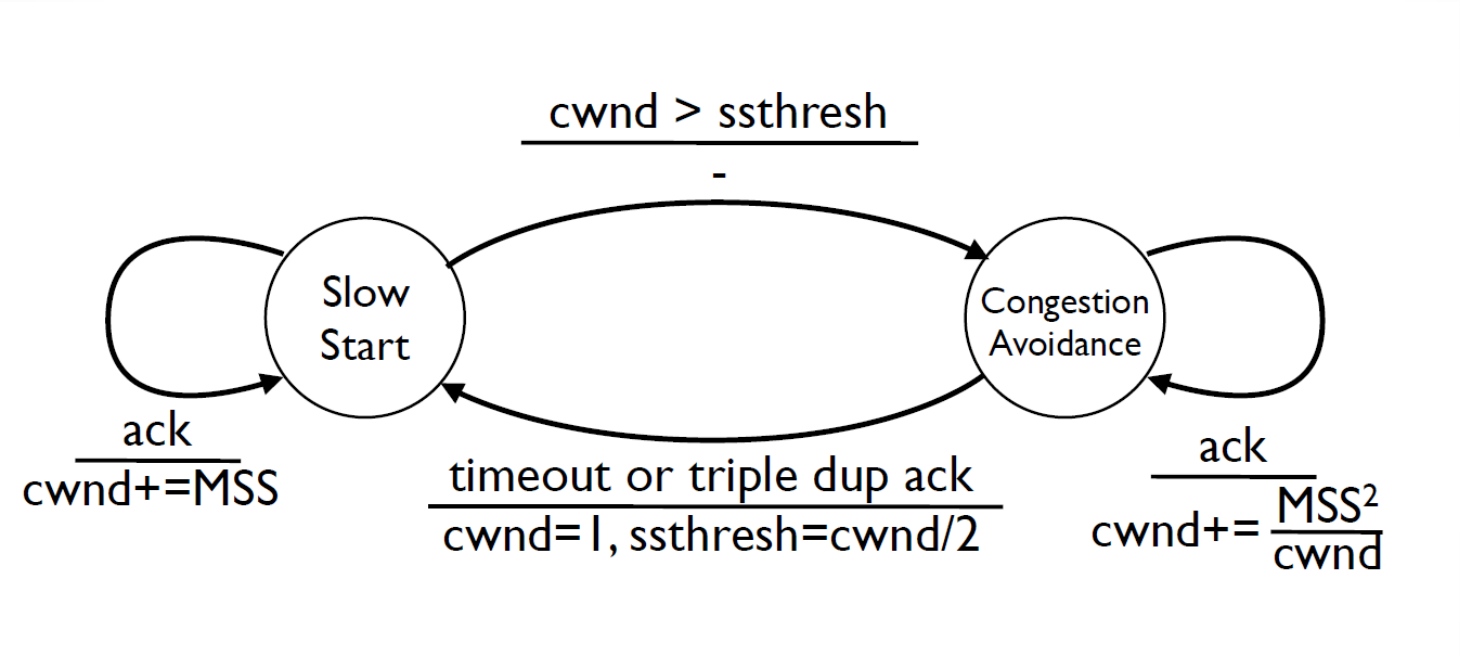
Стратегия Tahoe

- *Стратегия:*
  - *Используя медленный старт, быстро нащупать доступную пропускную способность сети*
  - *Приблизившись к насыщению, перейти в режим предотвращения перегрузки, очень осторожно пробируя возможность роста*

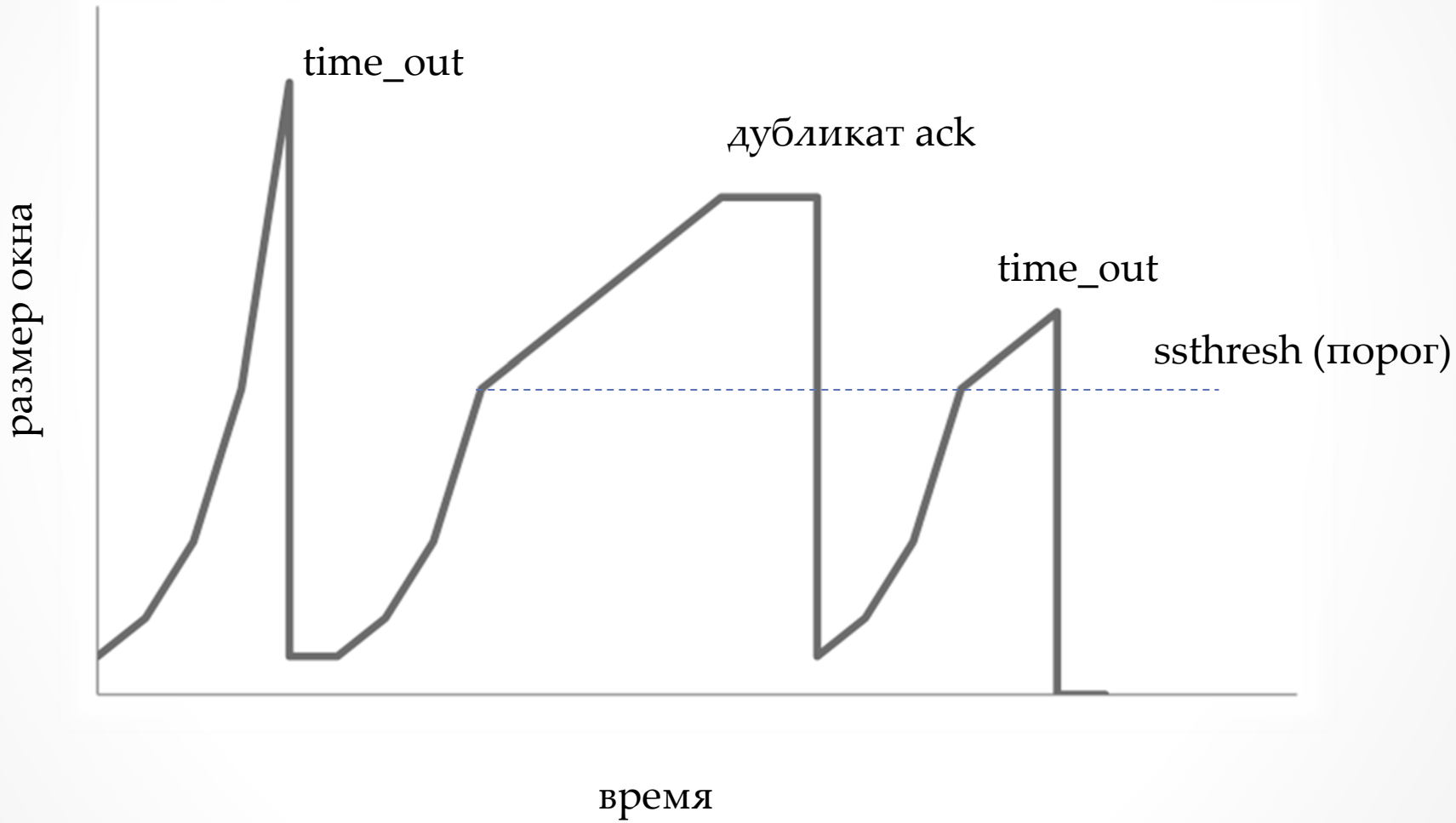
- *Признак перегрузки - Потеря пакета*
  - *по таймеру;*
  - *3 повторных подтверждения (всего 4 подтверждения с одинаковым номером).*

- *Три сигнала:*
  - *Рост номеров уведомлений – передача данных идет хорошо*
  - *Повторные уведомления – где-то произошла задержка/потеря данных, прекратить увеличение окна перегрузки*
  - *Если наступил Time_out или три раза получили dup ACK с одним и тем же номером, то устанавливаем порог = cwnd/2, cwnd = 1 и переходим в фазу медленного страта*
  - *Если пришло ACK с нужным номером, то продолжаем в фазе предотвращения перегрузки*

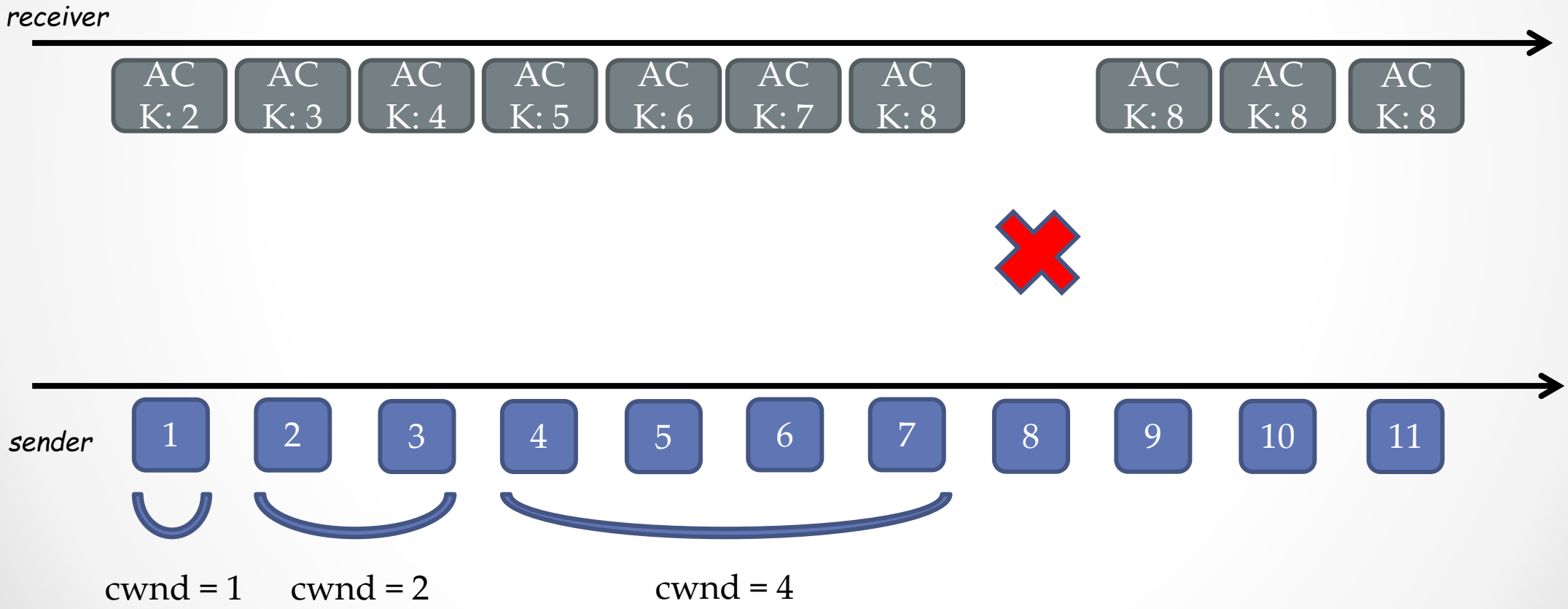
Диаграмма состояний TCP Tahoe



Динамика TCP Tahoe



Пример работы TCP Tahoe

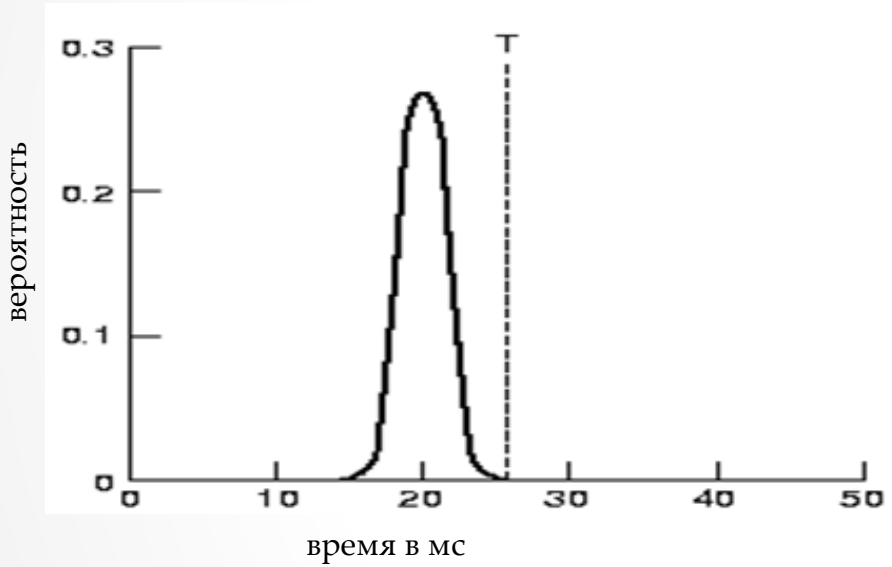


Оценка time-out

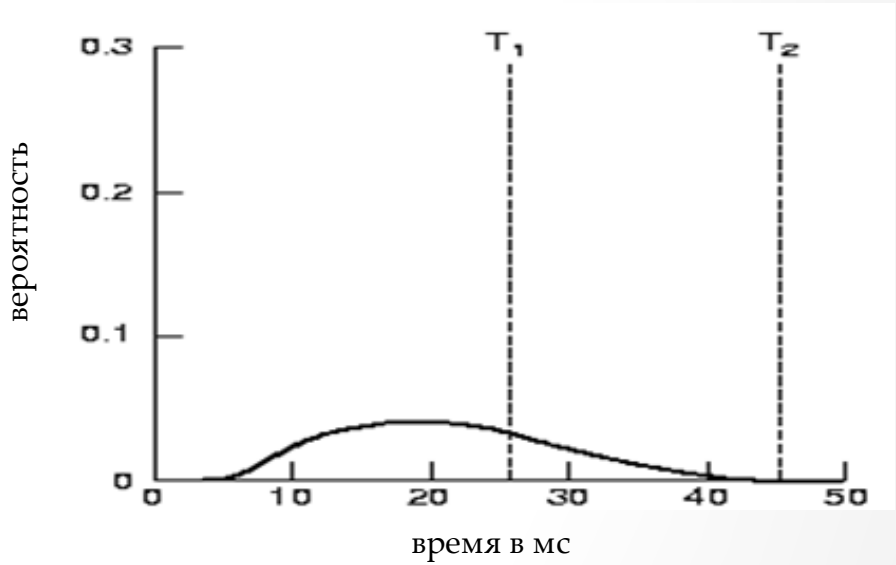
- *RTT измерение критично для оценки time-out*
  - *Если слишком коротко – впустую тратим ресурсы сети на повторные передачи, «ломаем» медленный старт*
  - *Если слишком длинный – зря тратим ресурсы на ожидание*

- *Трудности –*
  - *RTT меняется очень динамично*
  - *RTT сильно зависит от загрузки (load) сети*

Распределение задержки на канальном и транспортном уровнях



На канальном уровне



На транспортном уровне

Pre Tahoe time_out

- r – переменная, начальная оценка RTT
- m – измерение RTT для последнего подтвержденного пакета
- Вычисляем взвешенное среднее –

  $r := \alpha * r + (1-\alpha) * m$, где $0 < \alpha < 1$ (обычно 7/8)
- Time_out = $\beta * r$, где $\beta = 2$

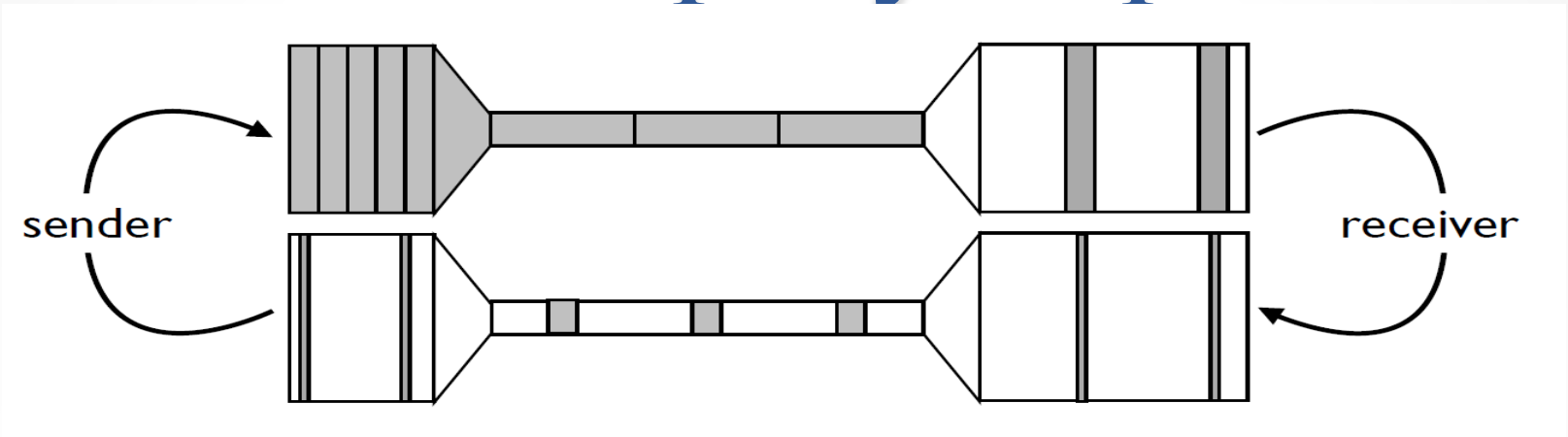
- В чем проблема?

  β - постоянная величина и не учитывает разброс значений m

TCP Tahoe time-out (т.2 стр.132-134)

- *r – переменная, начальная оценка RTT*
- *m – измерение RTT для последнего подтвержденного пакета*
- *Ошибка – e:=m-r.*
- *Вычисляем r:= ar + (1-a)m, где 1-a~ 0.125*
- *Измеряем вариацию – v := av + (1-a)|e| (линейное отклонение)*
- *time-out = r + β*v, где β=4*
- *В случае повторной передачи RTT = β * time-out*

Саморегулировка



Отправлять данные только после того, как предыдущие покинули сеть

Посылать данные только при получении уведомления

Отправлять уведомления как можно быстрее – это важно!

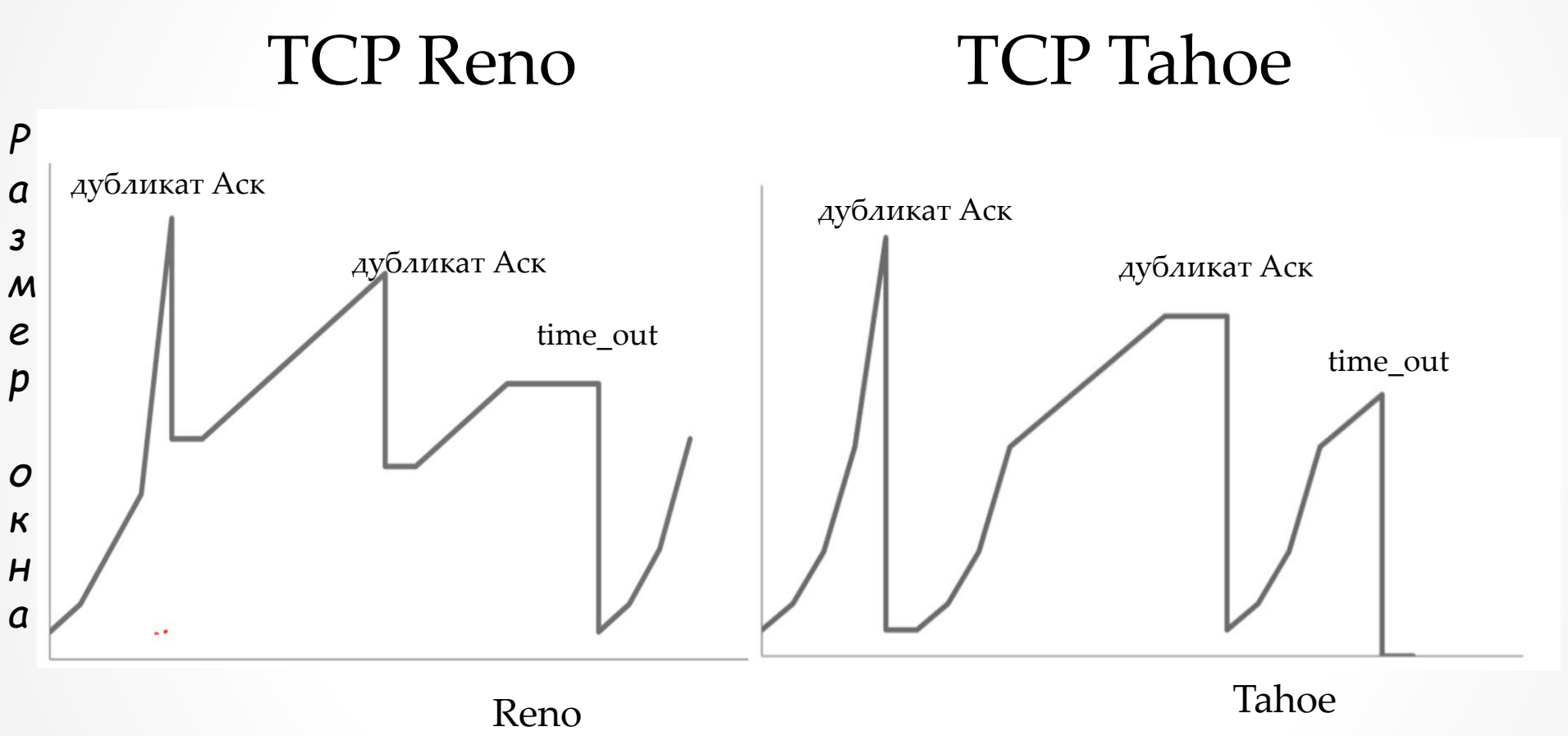
Прочесть «Congestion Avoidance and Control» van Jacobson and Karels

TCP Reno

TCP Tahoe vs TCP Reno

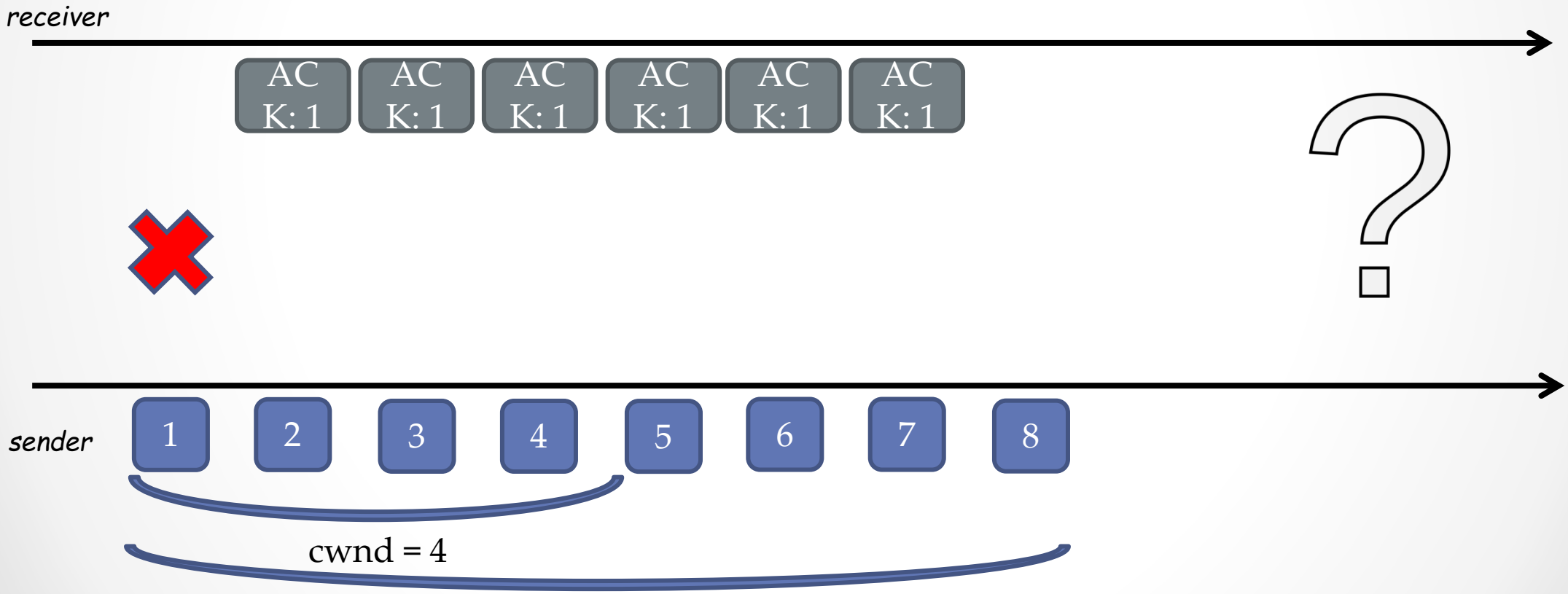
- *TCP Tahoe - Не ждать time-out, а уже по тройному уведомлению (подразумевается потеря пакета) начинать повторную пересылку и переход в фазу медленного старта*
  - *установить порог = CWDN/2*
  - *сбросить CWDN в 1*
  - *начать медленный старт*
- *TCP Reno – Добавлены фазы быстрой переотправки (fast retransmit) и быстрого восстановления (fast recovery):*
  - *по тройному ACK*
    - *cwnd = cwnd/2, а не 1*
    - *шлем запрашиваемый сегмент (fast retransmit)*
    - *Переходим в фазу быстрого восстановления (fast recovery)*
  - *По time-out схема Tahoe*

TCP Tahoe vs TCP Reno



Быстрое восстановление

Какая должна быть реакция на большое количество повторных подтверждений ?



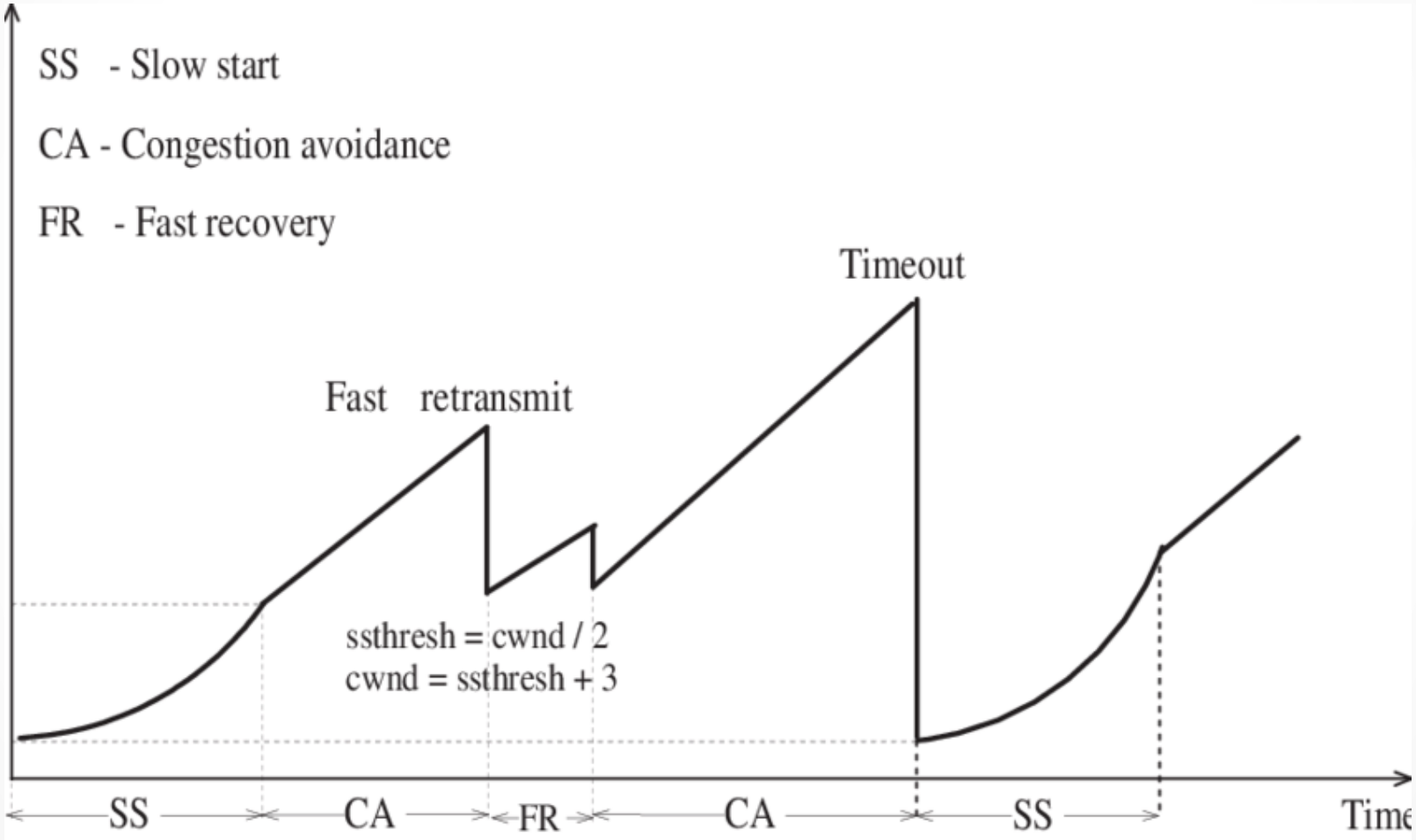
Быстрое восстановление

- *Окно перегрузки определяет количество пакетов, которое может одновременно находиться в сети*
- *Повторное подтверждение означает, что некоторый пакет был доставлен не по порядку -> в сети стало меньше пакетов, чем cwnd*
- *3 повторных подтверждения означают, что 3 пакета покинуло сеть*
- *Проблема: мы не можем сдвинуть sliding window вправо на 3 позиции из-за неподтвержденного пакета*
- *Решение: т.к sliding window > congestion window, то мы можем продолжить отправку пакетов, не боясь перегрузить получателя.*

Быстрое восстановление

- *В начале фазы быстрого восстановления устанавливаем окно в cwnd/2 + 3*
- *Каждое последующее повторное подтверждение означает выход еще одного пакета из сети, поэтому на каждый dup ack увеличиваем cwnd на 1: cwnd += 1*
- *При получении подтверждения на переотправленный пакет мы можем двигать левую границу cwnd, поэтому возвращаем значение cwnd в cwnd/2.*

Быстрое восстановление



Определение перегрузки

- Потеря пакета
  - по таймеру;
  - 3 повторных подтверждения
- По изменению RTT (при перегрузке увеличивается задержка буферизации)
- По уведомлениям из сети (ECN)
- Гибридные методы

Управление перегрузками: Заключение

- *Одна из сложнейших проблем в компьютерных сетях (особенно на неоднородных, протяженных, с ошибками соединениях)*
- *Основной подход: AIMD (additive increase, multiple decrease)*
- *Дома построить диаграмму состояний для TCP Reno*