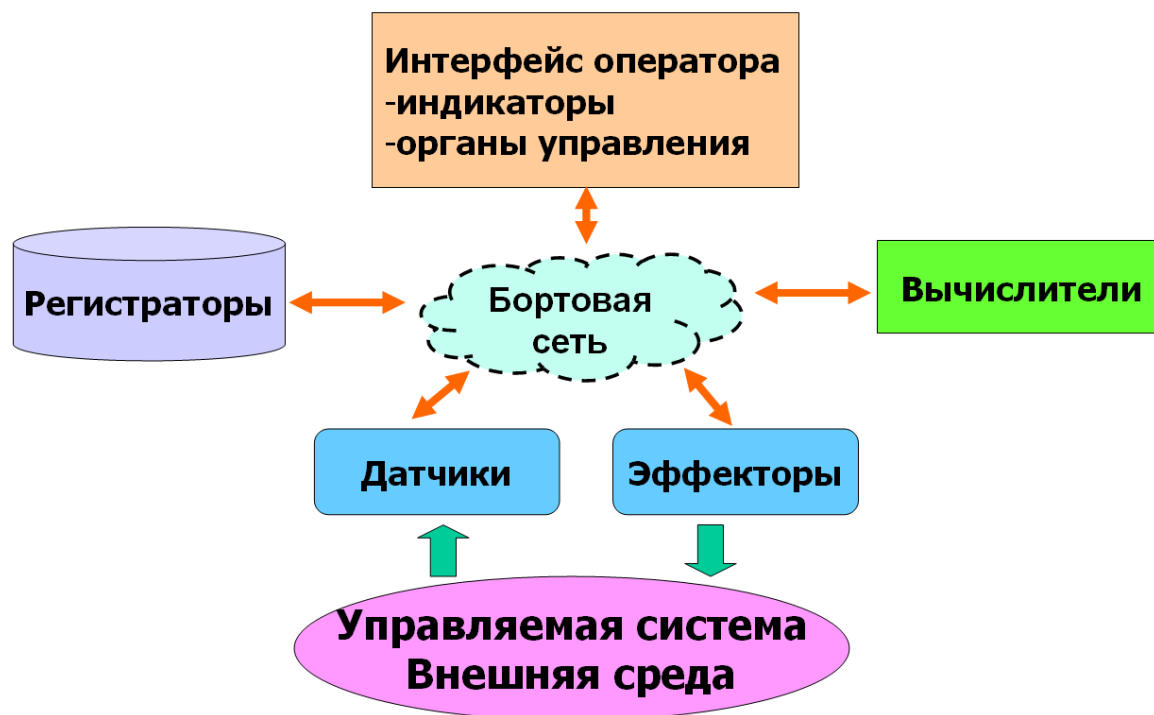


Коммутируемые сети в ИУС РВ

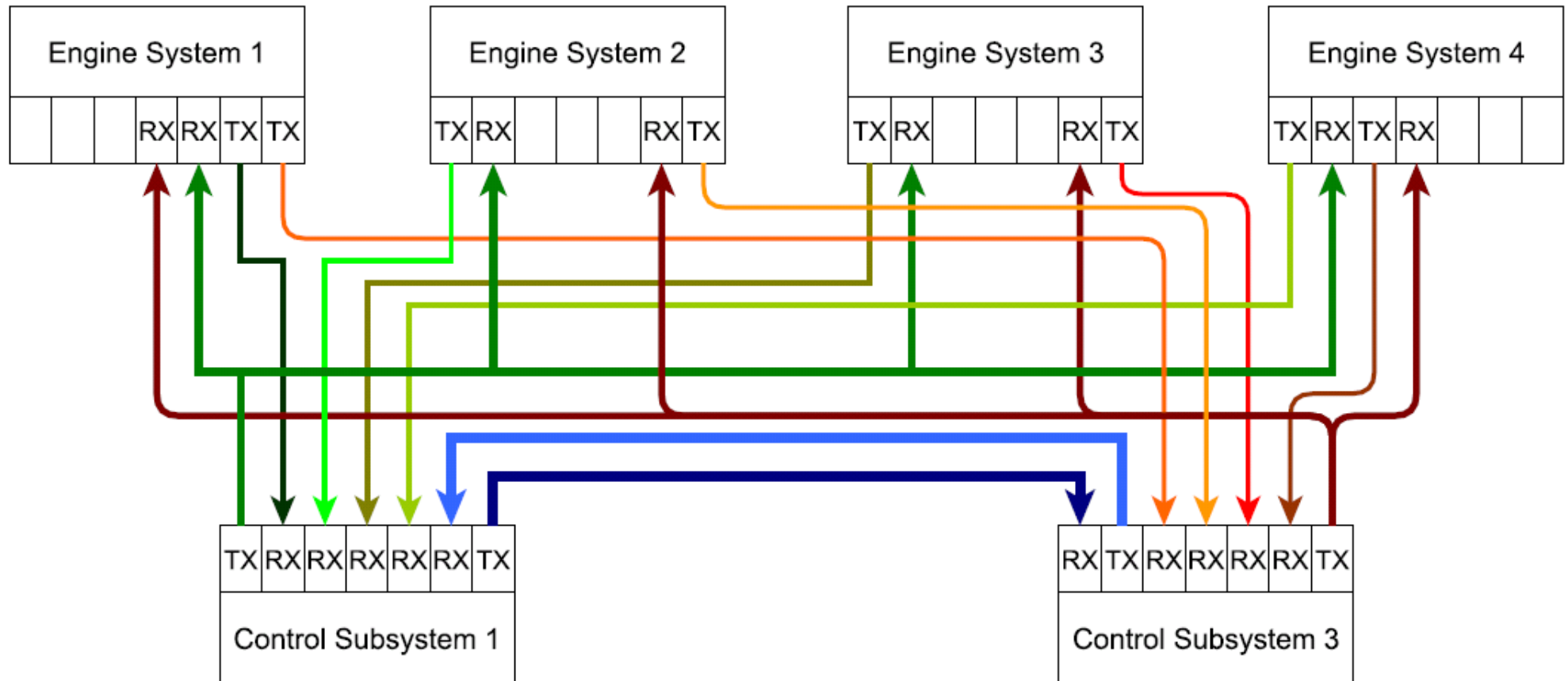
Кафедра АСВК,
Лаборатория Вычислительных Комплексов
Балашов В.В.

Бортовые сети

- Бортовые сети – обеспечение связи между бортовыми подсистемами
 - Надежная доставка
 - Соблюдение требований реального времени

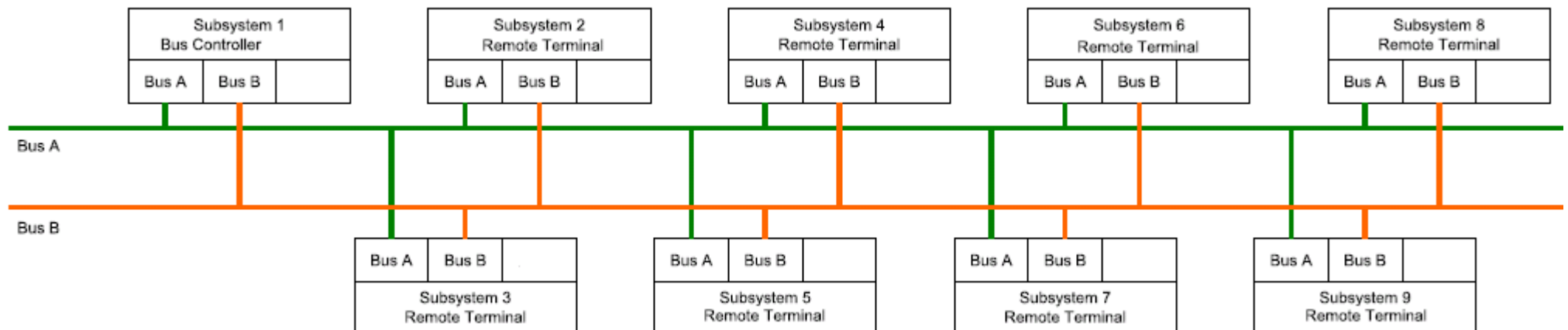


Каналы точка-точка



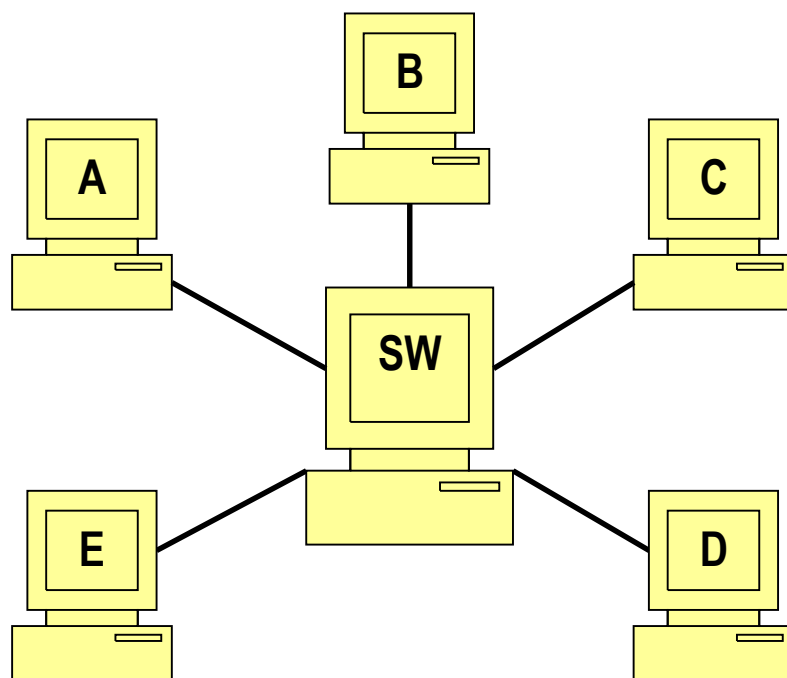
- Много кабелей
- Пропускная способность: недоиспользование, нехватка, сложность наращивания
- Сложно закладывать резерв
- Проблемы с передачей данных по сложному маршруту
- Низкая адаптивность (невозможна реконфигурация)

Интеграция каналов, мультиплексирование трафика



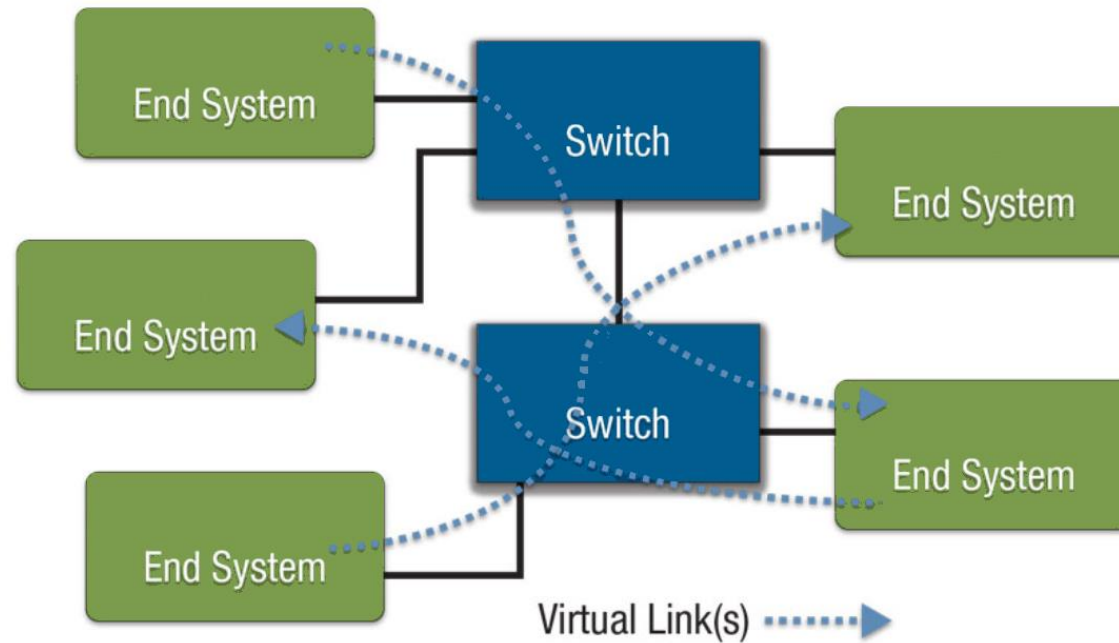
- Много каналов точка-точка → общая шина для многих потоков данных
- Проблема коллизий при доступе к шине
 - синхронизация доступа (нужно единое время)
 - централизованное управление (накладные расходы...)
- Последовательная обработка запросов => задержки
- Нет устойчивости к «генерации» в канале при выходе абонента из строя

Коммутатор: параллелизм обмена



- Дуплексные (двунаправленные) каналы
- Частичный параллелизм обмена
 - $A \rightarrow B \parallel B \rightarrow C \parallel C \rightarrow D$ – нет конфликта
 - $A \rightarrow B, C \rightarrow B$ – конфликт на линии $SW \rightarrow B$; как делить линию?
- Неустойчивость к «генерации»
- Проблема мультиплексирования потоков данных при отправке
- Оставшиеся конфликты – как лечить?
 - синхронизация доступа (нужно единое время)
 - централизованное управление (накладные расходы...)
 - верхние оценки задержек (а если между A и B большой поток?)

Виртуальные каналы



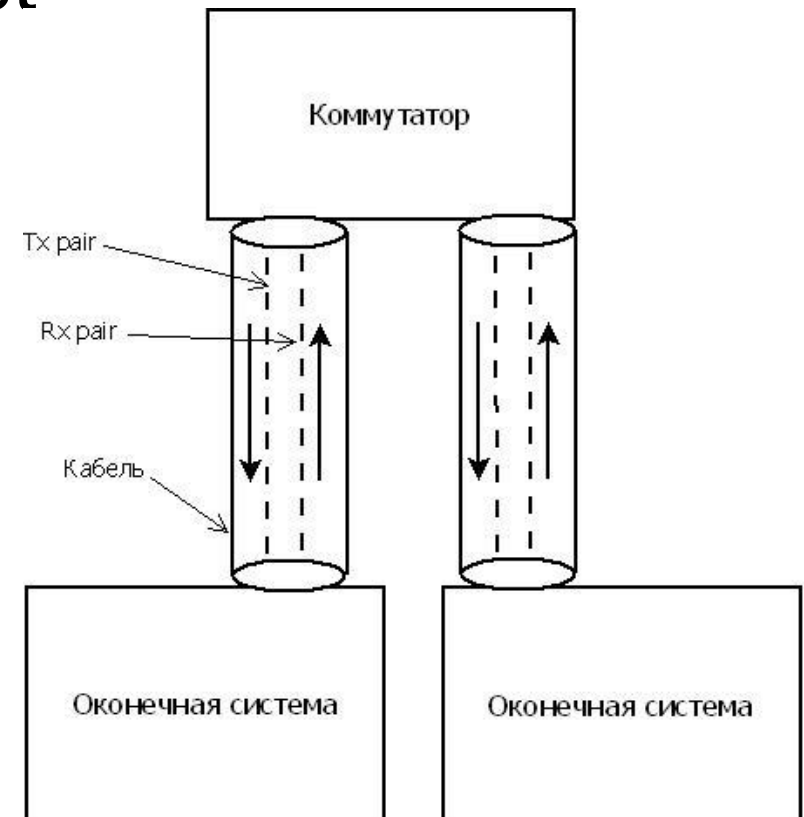
- Разделение пропускной способности, разграничение потоков данных
 - => пригодность для сложного трафика из множества потоков данных
- Гарантированные верхние границы задержек
- Резервирование, гибкость реконфигурации
- Реализация: согласованные действия отправителя и коммутаторов
- Устойчивость к «генерации»
 - коммутатор сбрасывает слишком частые кадры

Протоколы коммутируемых сетей с поддержкой ВК

- AFDX (на базе 100 Мбит Ethernet)
- FC-AE-ASM-RT (на базе Fibre Channel)

Стандарт AFDX

- Avionics Full-Duplex Ethernet (AFDX) – стандарт построения бортовых сетей на основе протокола Ethernet
 - Основан на протоколе Ethernet
 - Полнодуплексная передача данных
 - Позволяет достичь пропускной способности 100 Мбит/с на одном физическом соединении



Архитектура сети AFDX

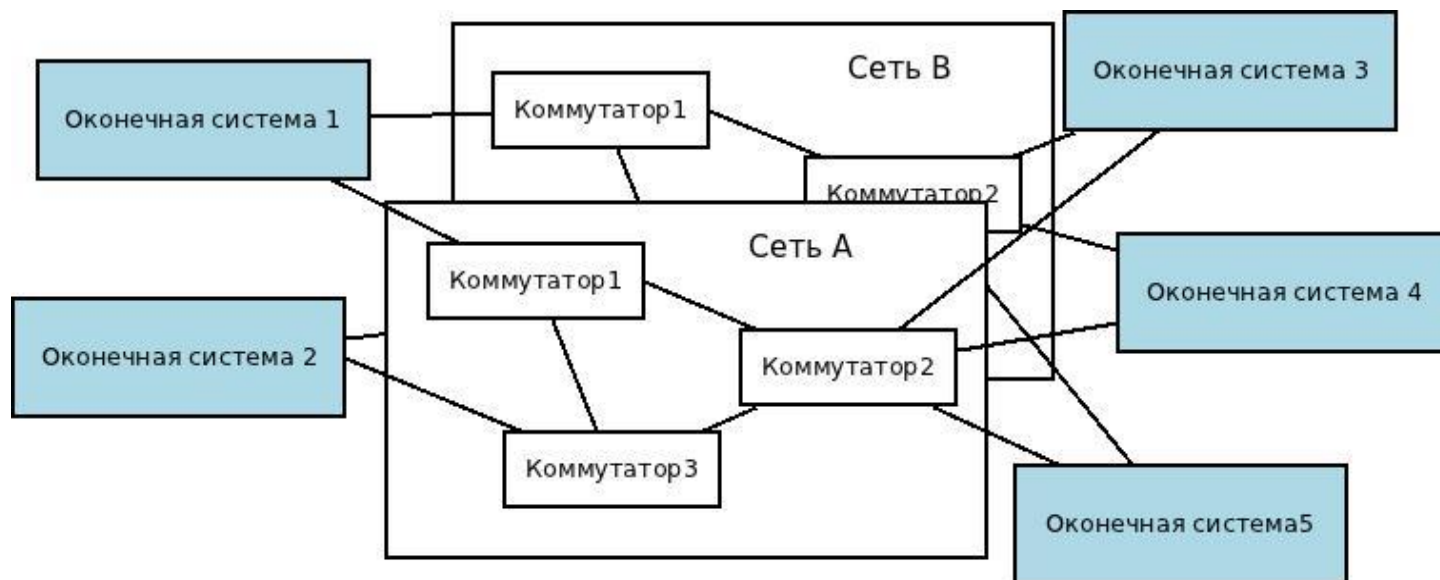
- Компоненты:

- Абоненты (бортовые подсистемы, отправители и получатели данных)
- Оконечные системы – интерфейс между абонентами и сетью
- Коммутаторы и физические соединения



Архитектура сети AFDX

- Дублирование сети для увеличения надежности передачи
 - Кадры передаются одновременно в обе сети
 - При диагностировании ошибки (например, несовпадение контрольной суммы) в одной сети данные берутся из другой сети
 - На конечной системе производится сброс кадра в случае, если кадр уже пришел из другой сети

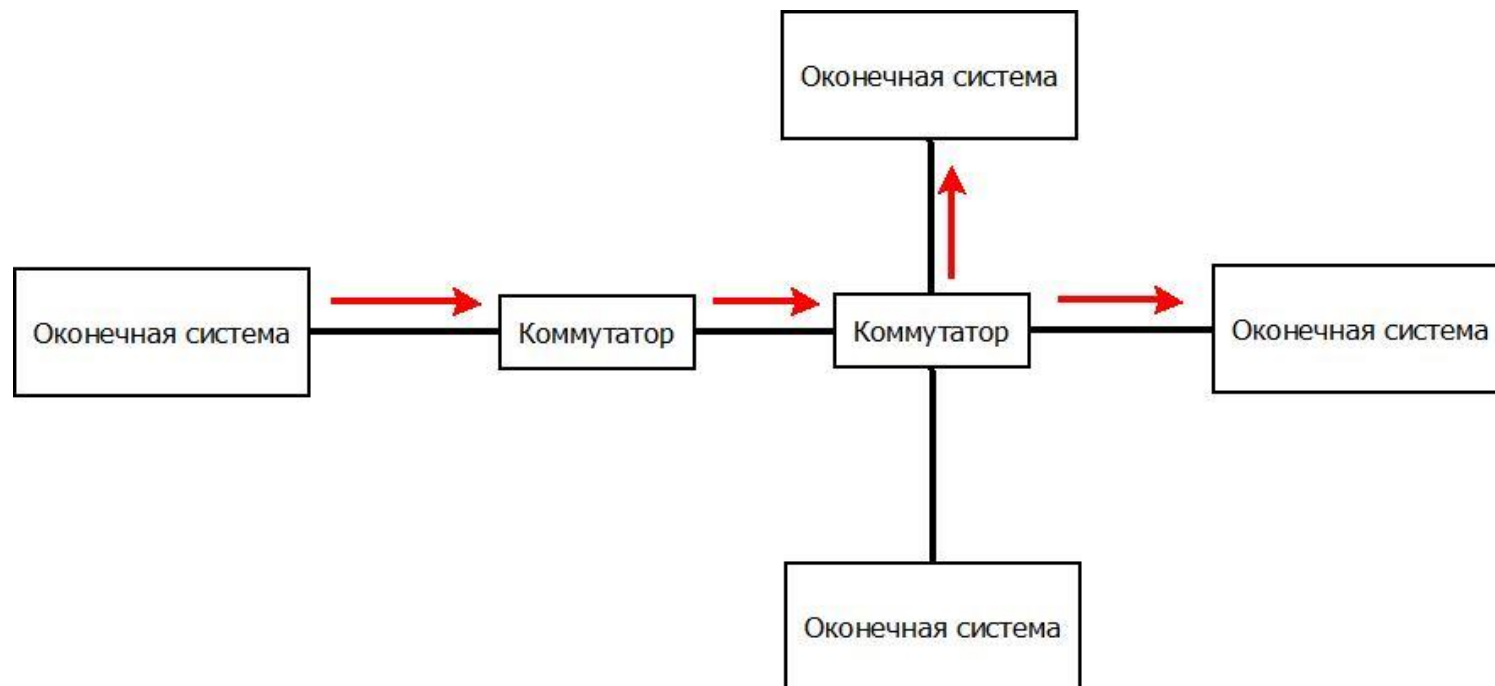


Стек протоколов

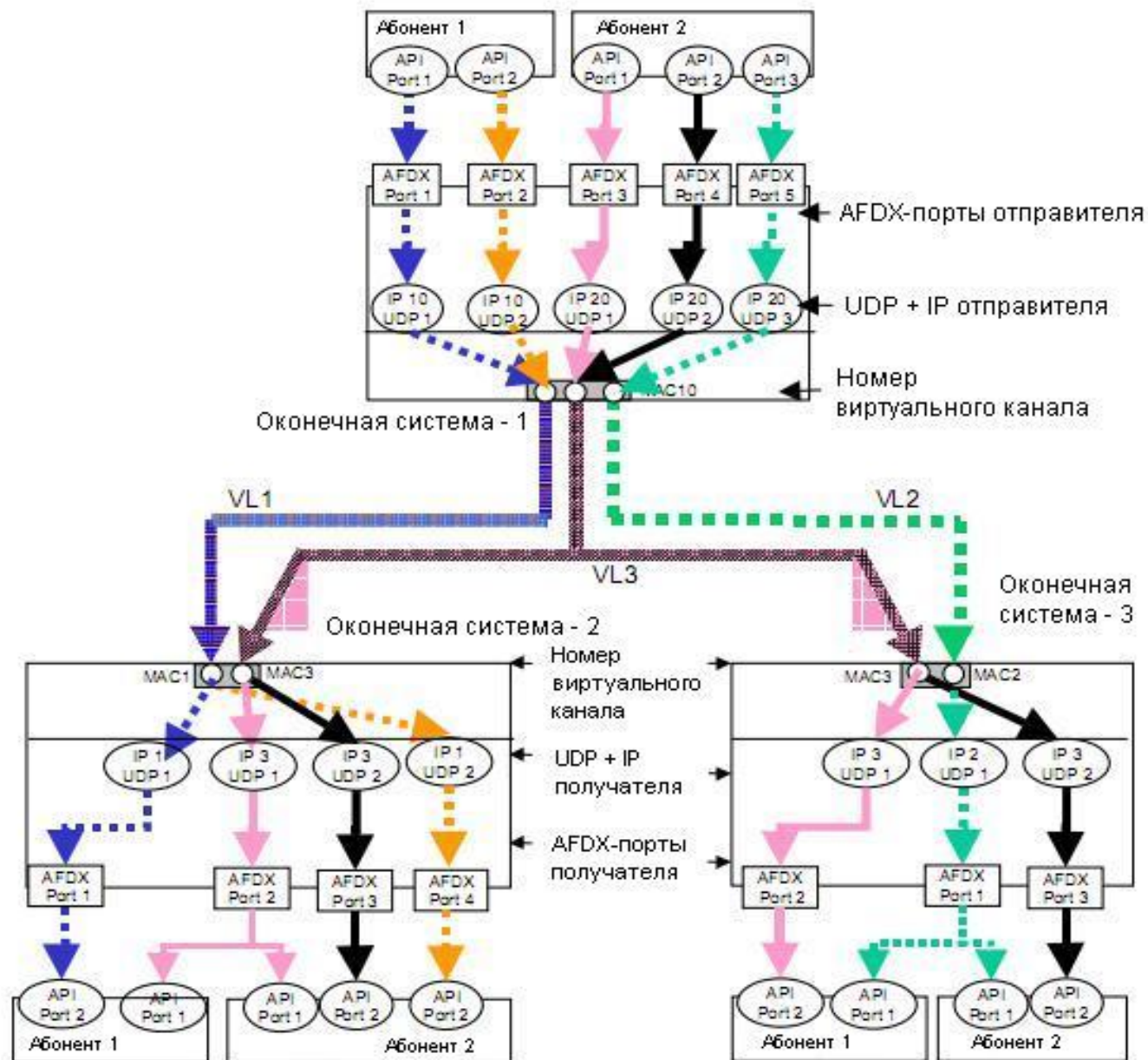
- Канальный уровень
 - Ethernet
 - Виртуальные каналы
 - Маршрутизация
- Сетевой уровень
 - IP (без маршрутизации)
- Транспортный уровень
 - UDP

Стек протоколов

- Виртуальные каналы
 - Одна оконечная система – отправитель и одна или более оконечная система – получатель
 - Маршрут следования кадров виртуального канала прописан статически в коммутаторах



Стек протоколов

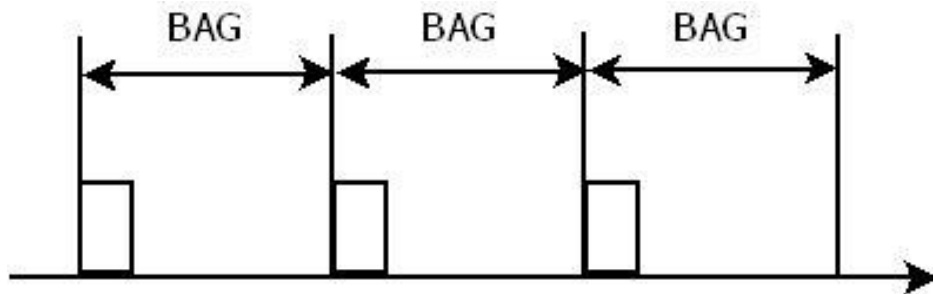


Параметры виртуальных каналов

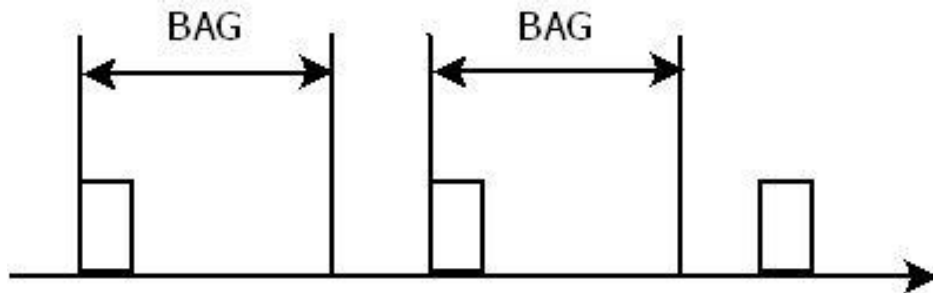
- Для каждого виртуального канала вводятся следующие параметры:
 - *BAG* – Bandwidth Allocation Gap – минимальный интервал времени между началами выдачи последовательных кадров на одном виртуальном канале (1-128 мс, является степенью двойки)
 - *L_{max}* – максимальный размер кадра (≤ 1518 байт)
 - *J_{max}* – максимально допустимое отклонение между кадрами от *BAG*

Параметры виртуальных каналов: *BAG*

- Использование *BAG* для достижения максимальной выделенной пропускной способности:



- Альтернативный вариант:



- В дальнейшем рассматривается только первый вариант передачи, без промежутков между соседними *BAG*

Пропускная способность виртуальных каналов

- Вычисление:

- $Bandwidth = L_{max} / BAG$

- $BAG = 32 \text{ мс}$

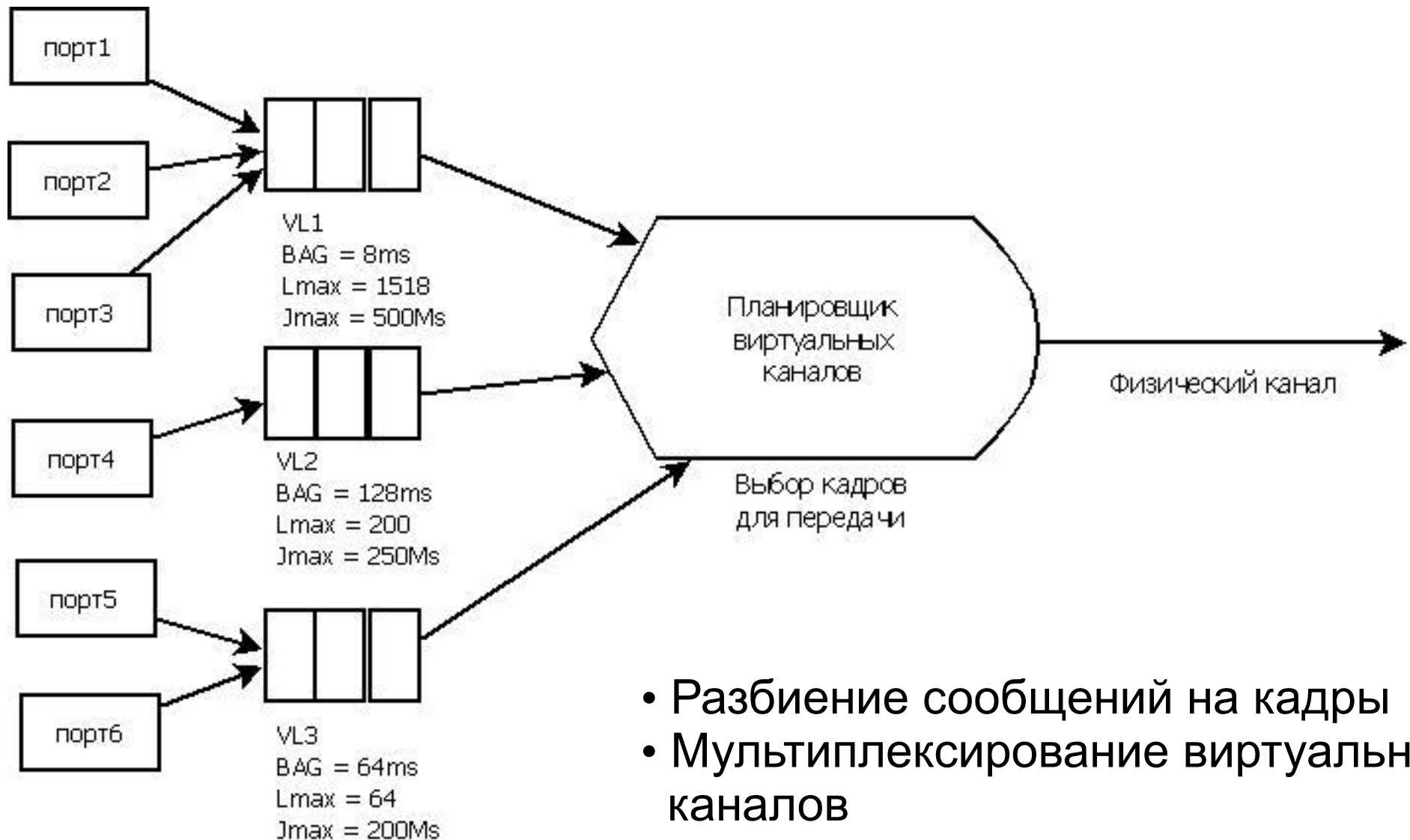
- $L_{max} = 200 \text{ байт}$

- $Bandwidth = 200 \text{ байт} / (32 / 1000) \text{ сек} = 6250 \text{ байт/сек}$

- Ограничение на зарезервированную пропускную способность на проводе:

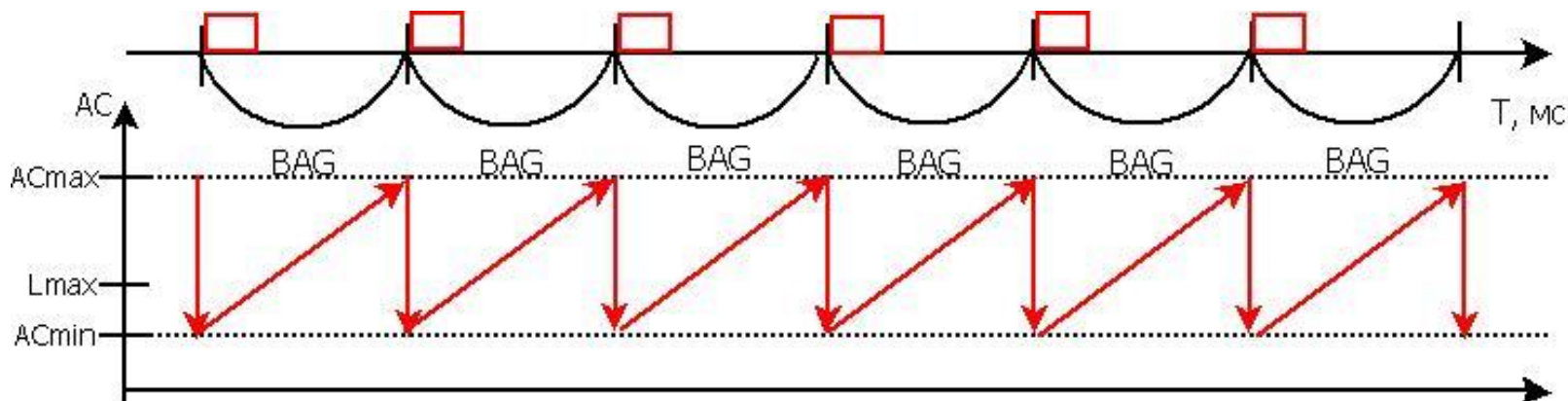
- $\sum_{VL=1..n} L_{VL,max} / BAG_{VL} \leq 100 \text{ Мбит/сек}$

Управление виртуальными каналами



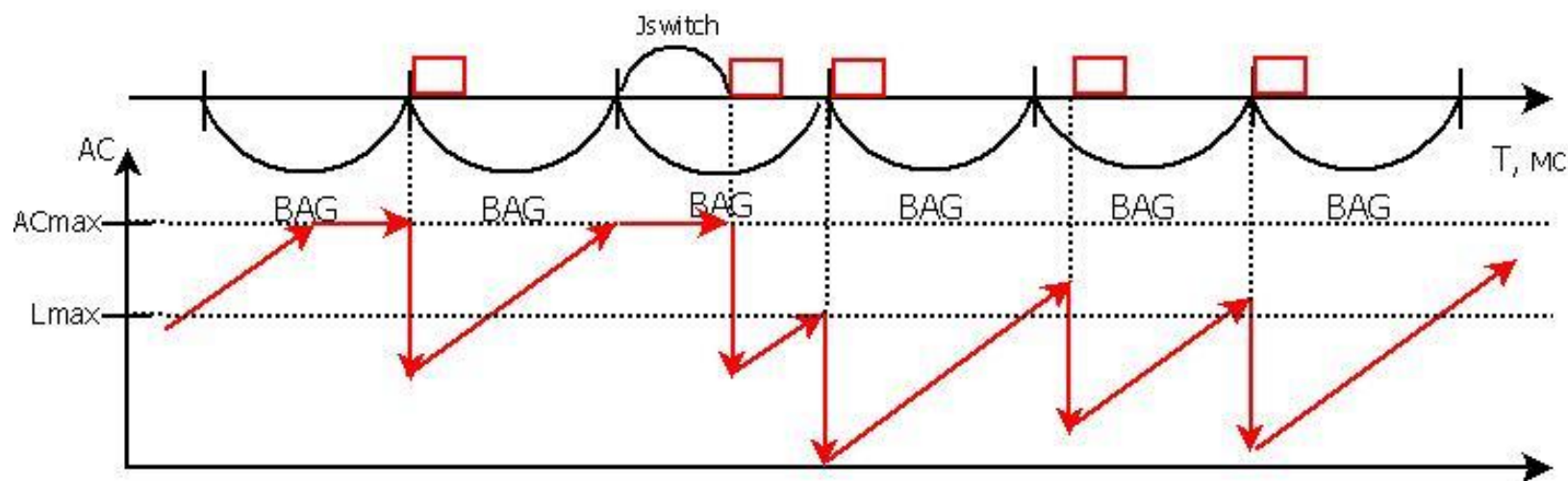
Контроль трафика на коммутаторе

- Контроль прихода кадров на соответствие BAG и J_{max} :
 - Производится на входном порту коммутатора
 - Используется алгоритм, основанный на вычислении кредита
 - AC – кредит, растет с течением времени до значения AC_{max}
 - При приходе кадра AC уменьшается на размер кадра, если кредита не хватает – кадр сбрасывается



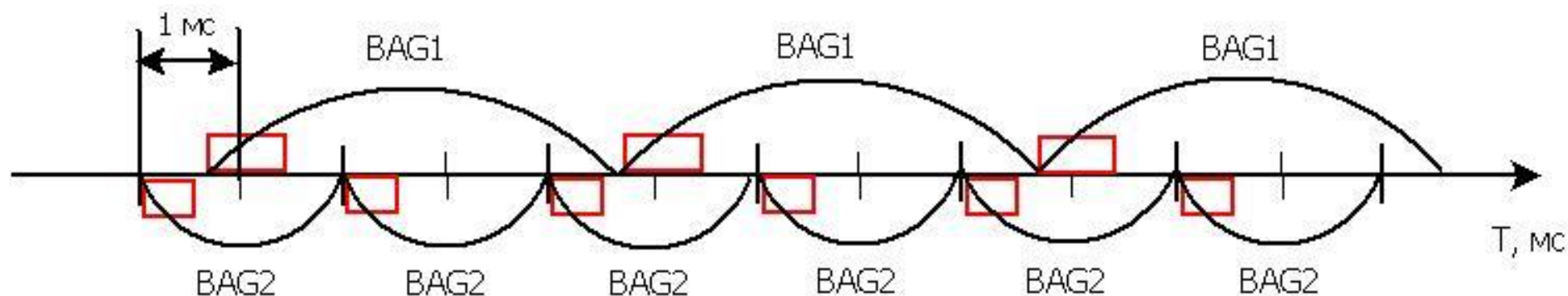
Контроль трафика на коммутаторе

- Кредит соответствует количеству байт, которые пропускает канал
 - За время BAG кредит увеличивается на L_{max}
 - AC_{max} – соответствует количеству байт, которое позволяет пропустить 2 кадра за $(BAG - J_{switch})$
 - Случай с неравномерной передачей кадров:



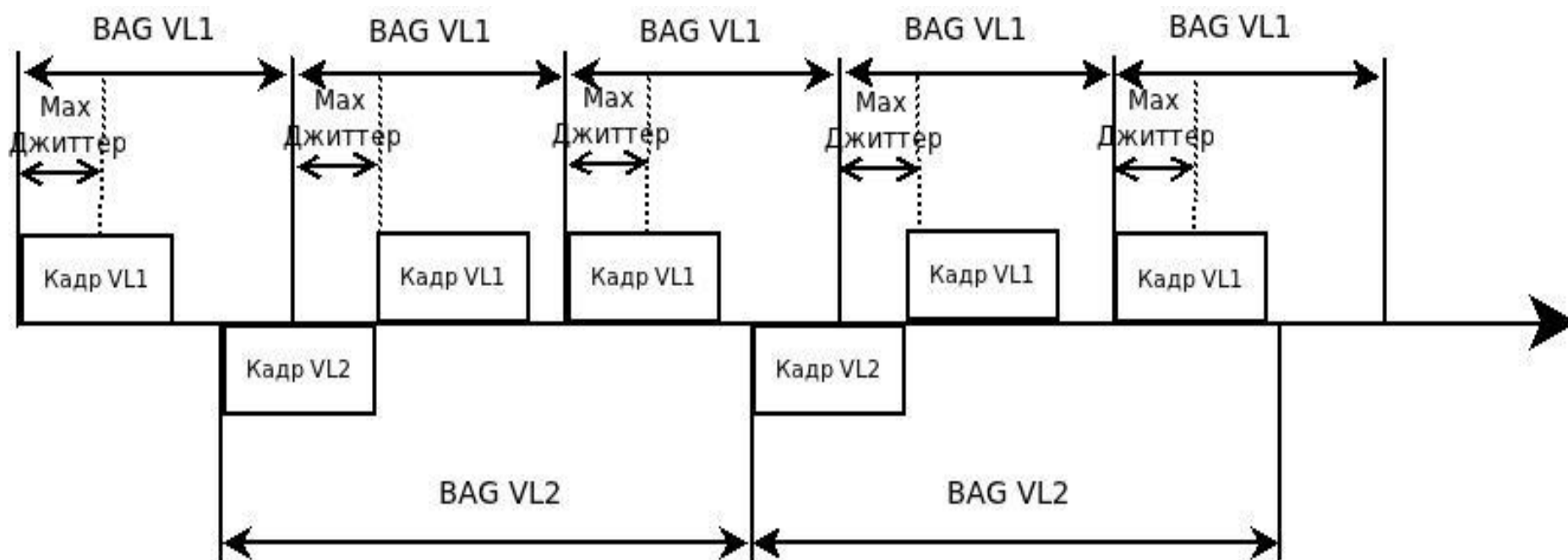
Формирование трафика

- При формировании трафика на отправителе – мультиплексирование
- При мультиплексировании определяется значение джиттера
- С нулевым джиттером:



Формирование трафика

- Мультиплексирование с ненулевым джиттером



Коммутатор

- Функции коммутатора:
 - Маршрутизация кадров по пути следования виртуальных каналов (пути виртуальных каналов конфигурируются статически)
 - Фильтрация трафика (контроль целостности кадра, контроль следования кадра по виртуальному каналу)
 - Контроль трафика
 - размер кадра (не должен превышать $L_{\max}$)
 - BAG, $J_{\max}$
 - нарушение => сброс кадра

Литература

1. Стандарт

Aircraft Data Network. Part 7. Avionics Full Duplex Switched Ethernet (AFDX) Network. // Aeronautical Radio, Inc. – 2012.

2. *AFDX® / ARINC 664 Tutorial*. TechSAT GmbH, Poing, 2008.

Задачи проектирования сети AFDX

- Дано: потоки данных, требования к их передаче в реальном времени
 - размер сообщения
 - частота передачи
 - макс. допустимый джиттер (end-to-end)
 - макс. допустимая задержка (end-to-end)
- Требуется:
 - построить систему виртуальных каналов и рассчитать их параметры (BAG, Lmax)
 - рассчитать конфигурационные параметры сетевых устройств – коммутаторов, абонентов (в т.ч. Jmax)

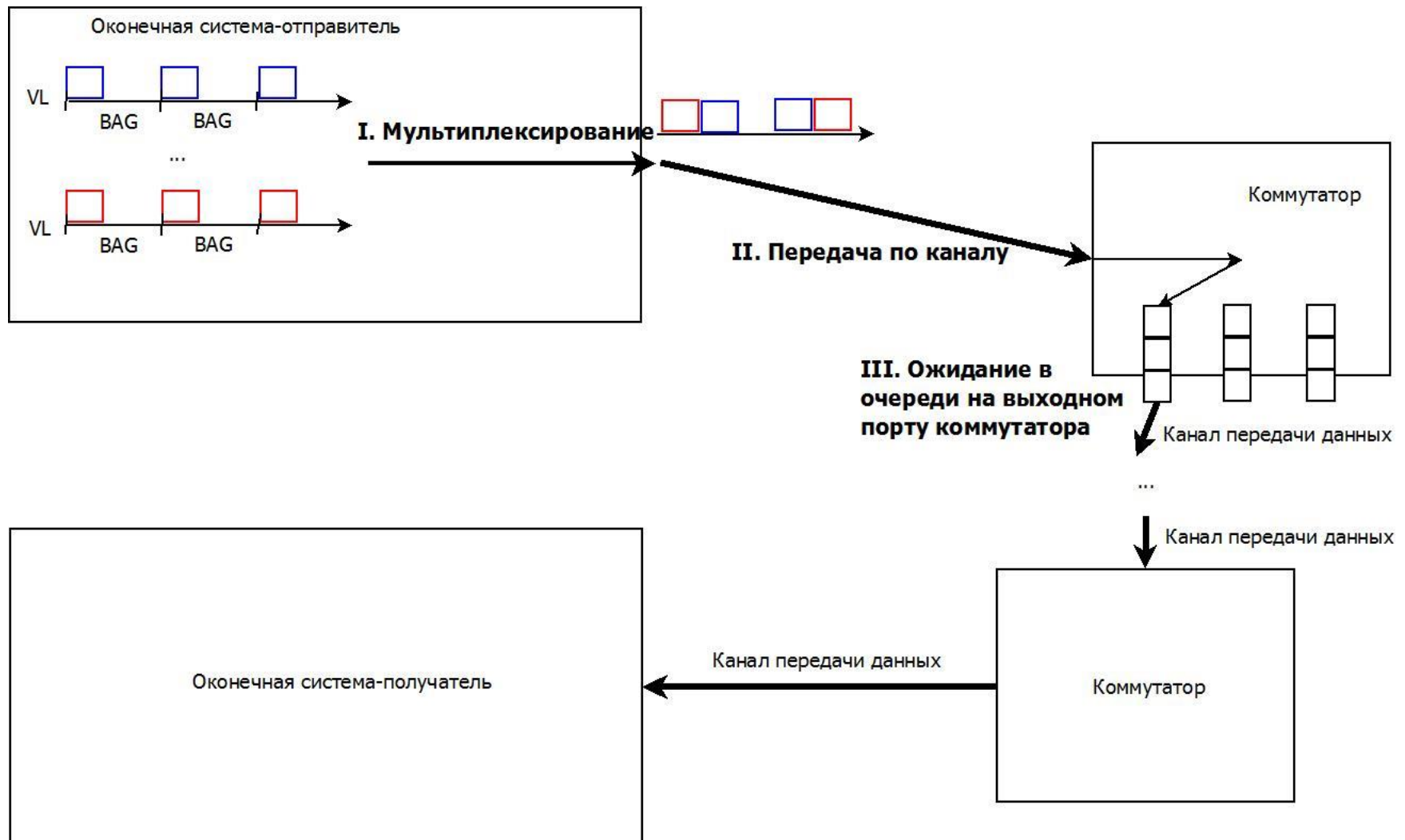
Оценка длительности передачи кадра

- Необходима для оценки длительности передачи сообщения
 - Актуальность: требования реального времени, длительность не должна превышать заданных значений
 - Длительность вычисляется с момента поступления кадра для выдачи в канал до момента поступления кадра на окончательную систему-получатель

Оценка длительности передачи кадра

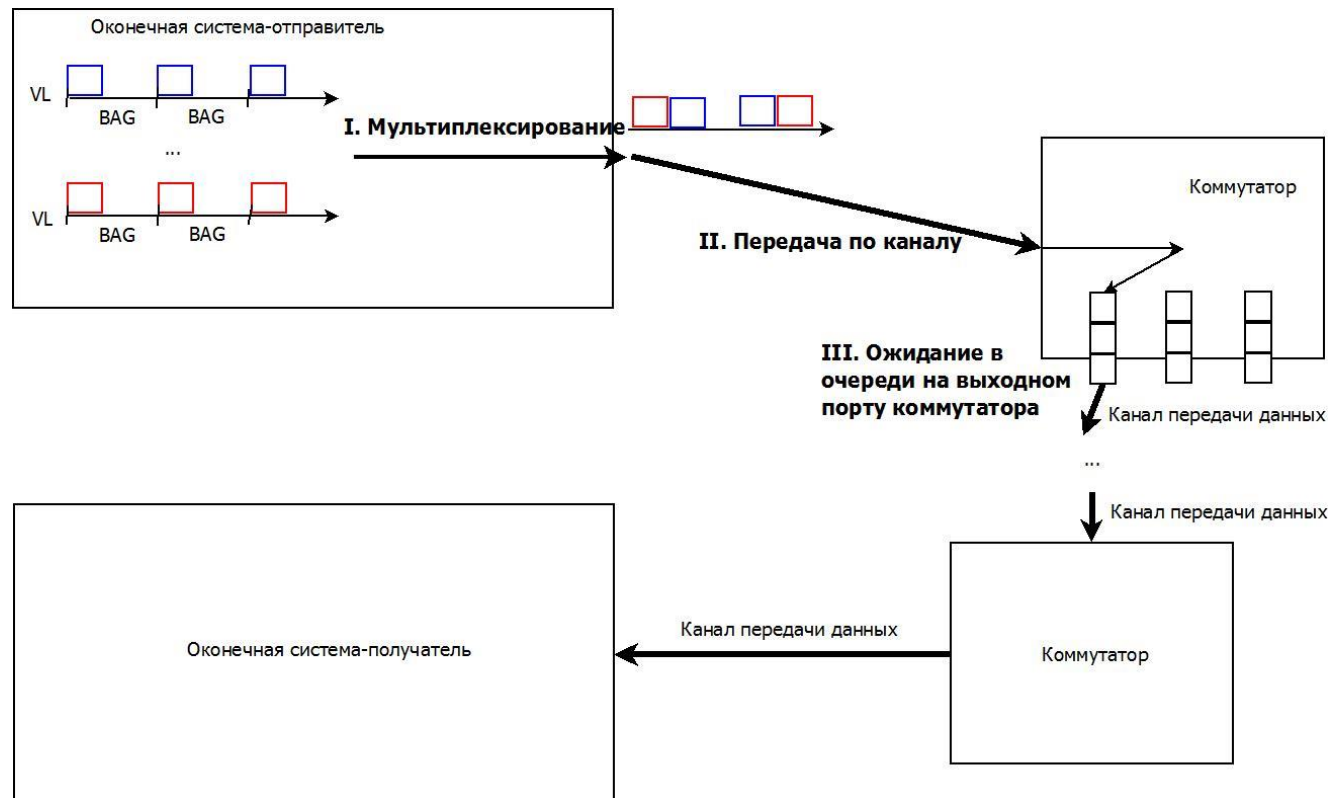
- Методы:
 - **Response-time analysis**
 - **Network Calculus**
 - Trajectory Approach
 - Model checking
 - Simulation approach

Оценка длительности передачи кадра



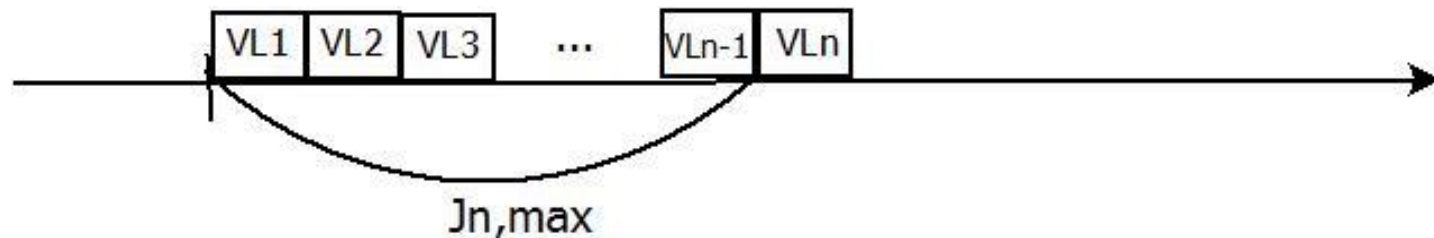
Оценка длительности передачи кадра

- Длительность передачи кадра:
 - максимальный джиттер на отправителе
 - длительность передачи по каналам
 - задержки на выходных портах коммутаторов



Оценка длительности передачи кадра

- Мультиплексирование
 - При мультиплексировании может возникать джиттер
 - Максимальная задержка – при максимальном джиттере
 - Максимальный размер джиттера – при ожидании всех кадров других виртуальных каналов



Оценка длительности передачи кадра

- Мультиплексирование

- Вычисление максимального джиттера на отправителе

- $$J_{\max} \leq 40\mu s + \frac{\sum_{i \in VLs} L_{i, \max}}{R}$$

- VLs – множество виртуальных каналов, формируемых на оконечной системе-отправителе

- R – скорость выдачи данных на канал (100 Мбит/сек)

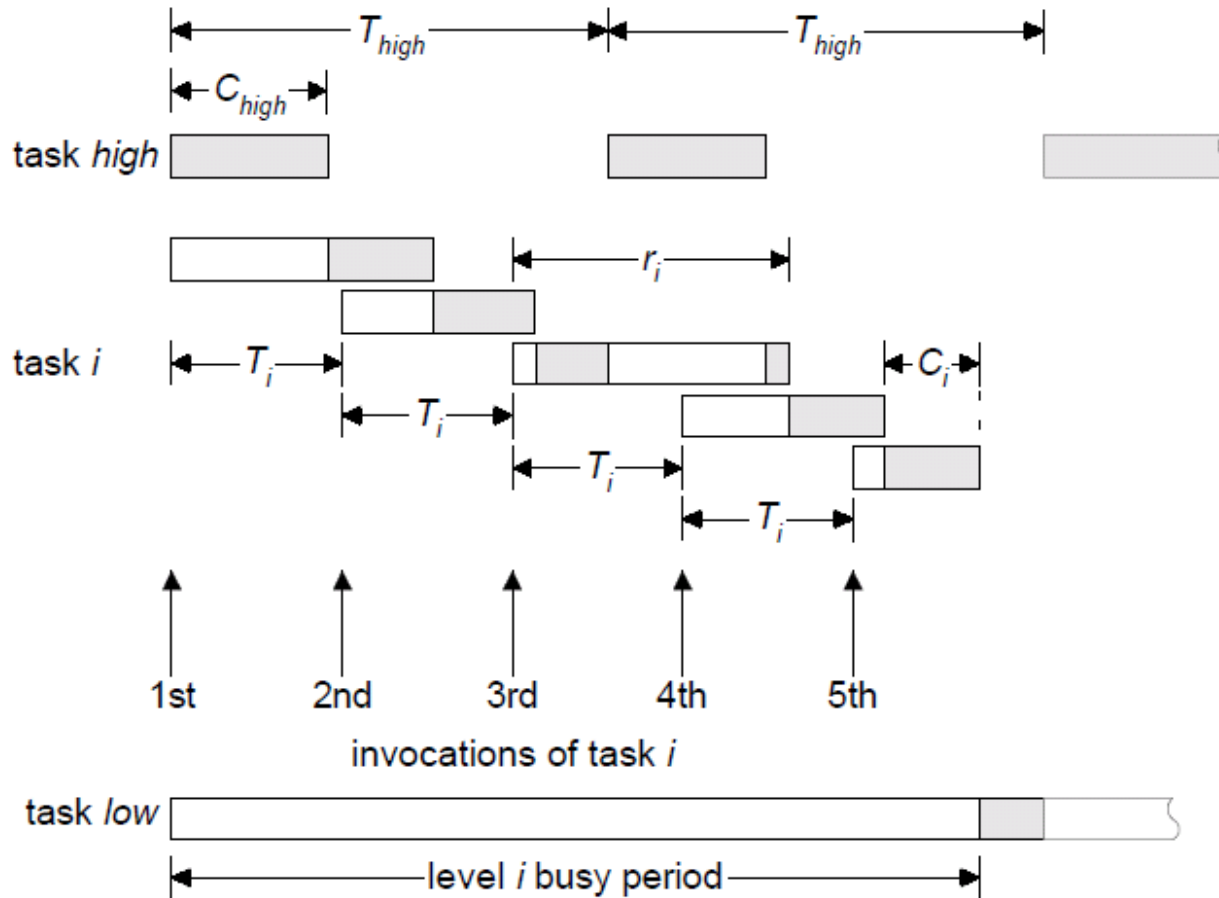
- 40 мкс – технический джиттера (время обработки кадра)

Оценка длительности передачи кадра

- Длительность передачи кадров по каналам
 - R – скорость выдачи данных на канал (100 Мбит/сек)
 - n – количество каналов передачи данных на пути следования кадра
 - Длительность передачи кадра по каналам:

- $$t_{links} = n \cdot \frac{L_{max}}{R}$$

Оценка задержки от кадров с других виртуальных каналов



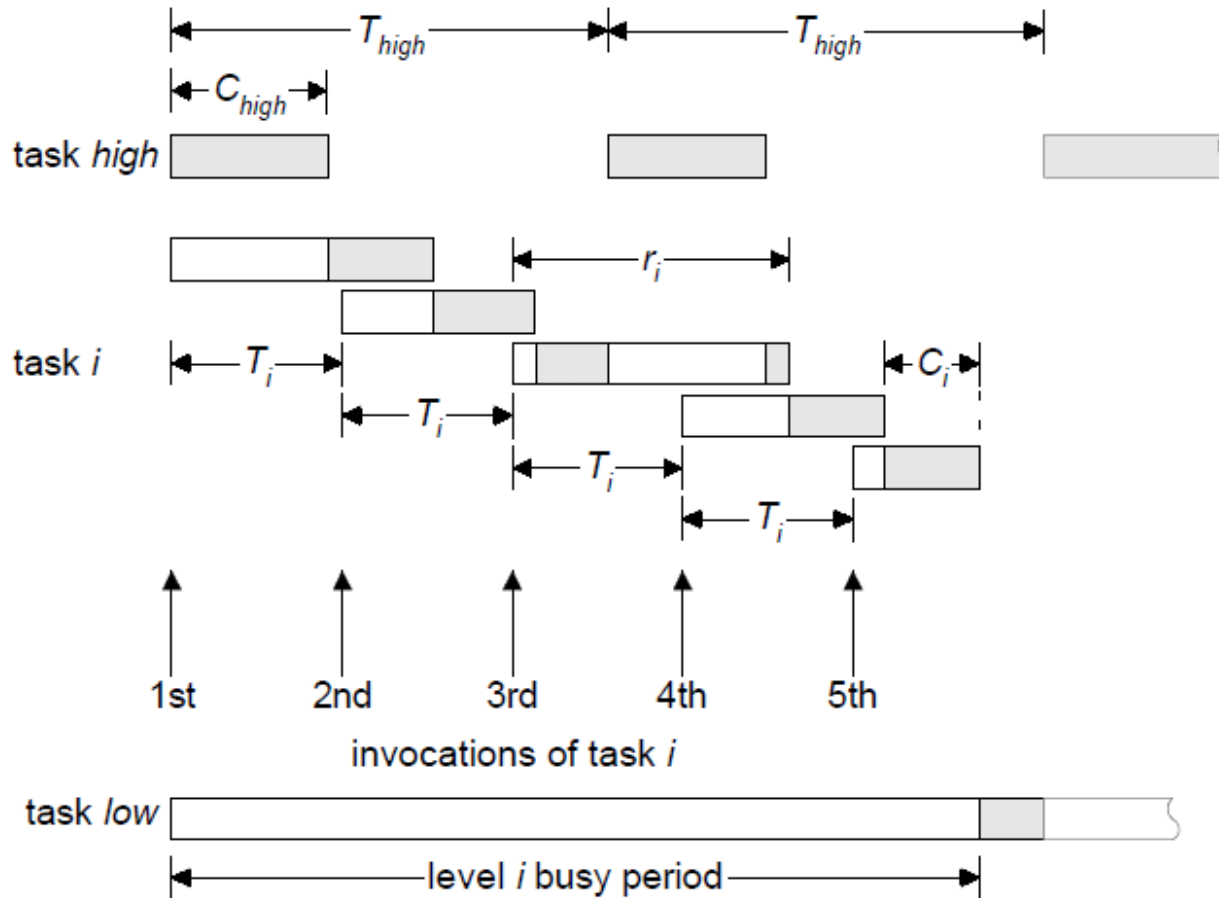
$$r_i = C_i + \sum_{\forall j \in hp(i)} \left\lceil \frac{r_i}{T_j} \right\rceil C_j$$

$$r_i^{n+1} = C_i + \sum_{\forall j \in hp(i)} \left\lceil \frac{r_i^n}{T_j} \right\rceil C_j$$

$$r_i = C_i + B_i + \sum_{\forall j \in hp(i)} \left\lceil \frac{r_i}{T_j} \right\rceil C_j$$

- Задержки – от кадров с других входов на тот же выход
- Метод: анализ времени отклика

Оценка задержки от кадров с других виртуальных каналов



$$r_i = C_i + B_i + \sum_{\forall j \in hp(i)} \left\lceil \frac{r_i}{T_j} \right\rceil C_j$$

$$w_{i,q} = (q+1)C_i + \sum_{\forall j \in hp(i)} \left\lceil \frac{w_{i,q}}{T_j} \right\rceil C_j$$

- Задержки – от кадров с других входов на тот же выход
- Метод: анализ времени отклика

Оценка длительности передачи кадра

- Вычисление максимальной задержки в очереди на выходном порту коммутатора на основе Response Time Analysis

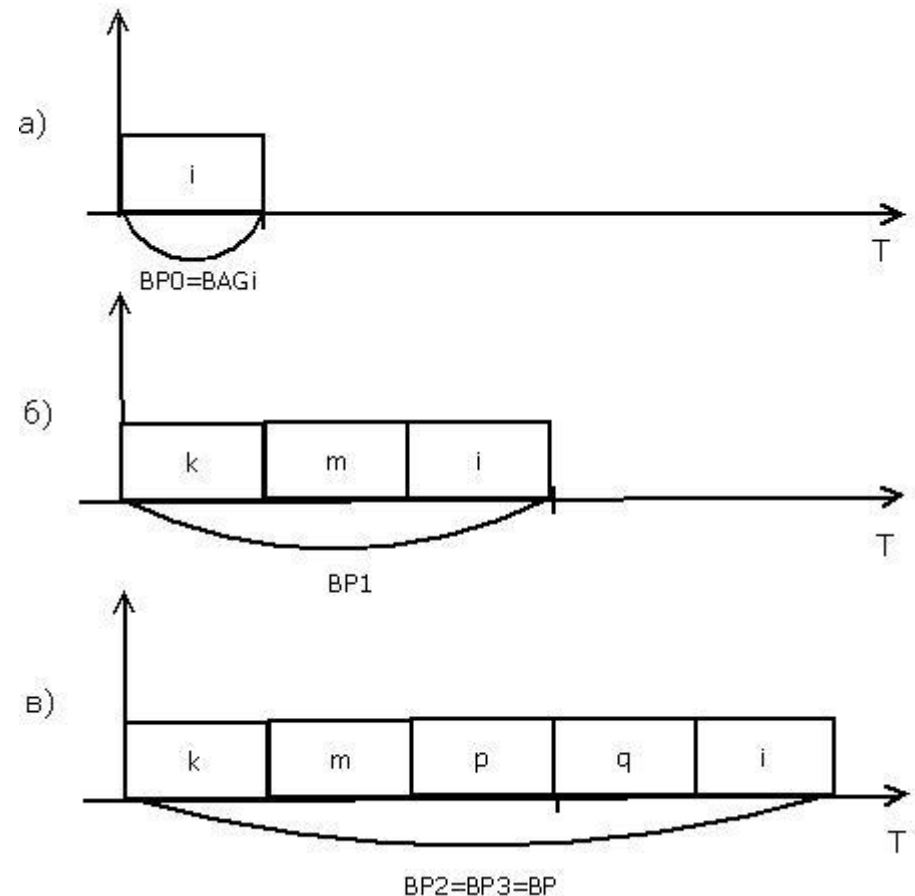
- Рассматривается некоторый элемент сети (в данном случае – буфер коммутатора)

- Busy period – максимальный период времени, в течение которого очередь не пуста

- Оценивается итеративно

Оценка длительности передачи кадра

- $BP(0) = BAG$ – начальная оценка busy period
- $BP(1)$ = сколько кадров других виртуальных каналов может прийти за $BP(0)$ * длительность выдачи
- $BP(2) = \dots$ через $BP(1)$
- ...
- $BP(n) = BP(n-1)$



Оценка длительности передачи кадра

- Вычисление максимальной задержки в очереди на выходном порту коммутатора на основе Network Calculus

- Рассматривается некоторый элемент сети (в данном случае – буфер коммутатора)

- Функция потока:

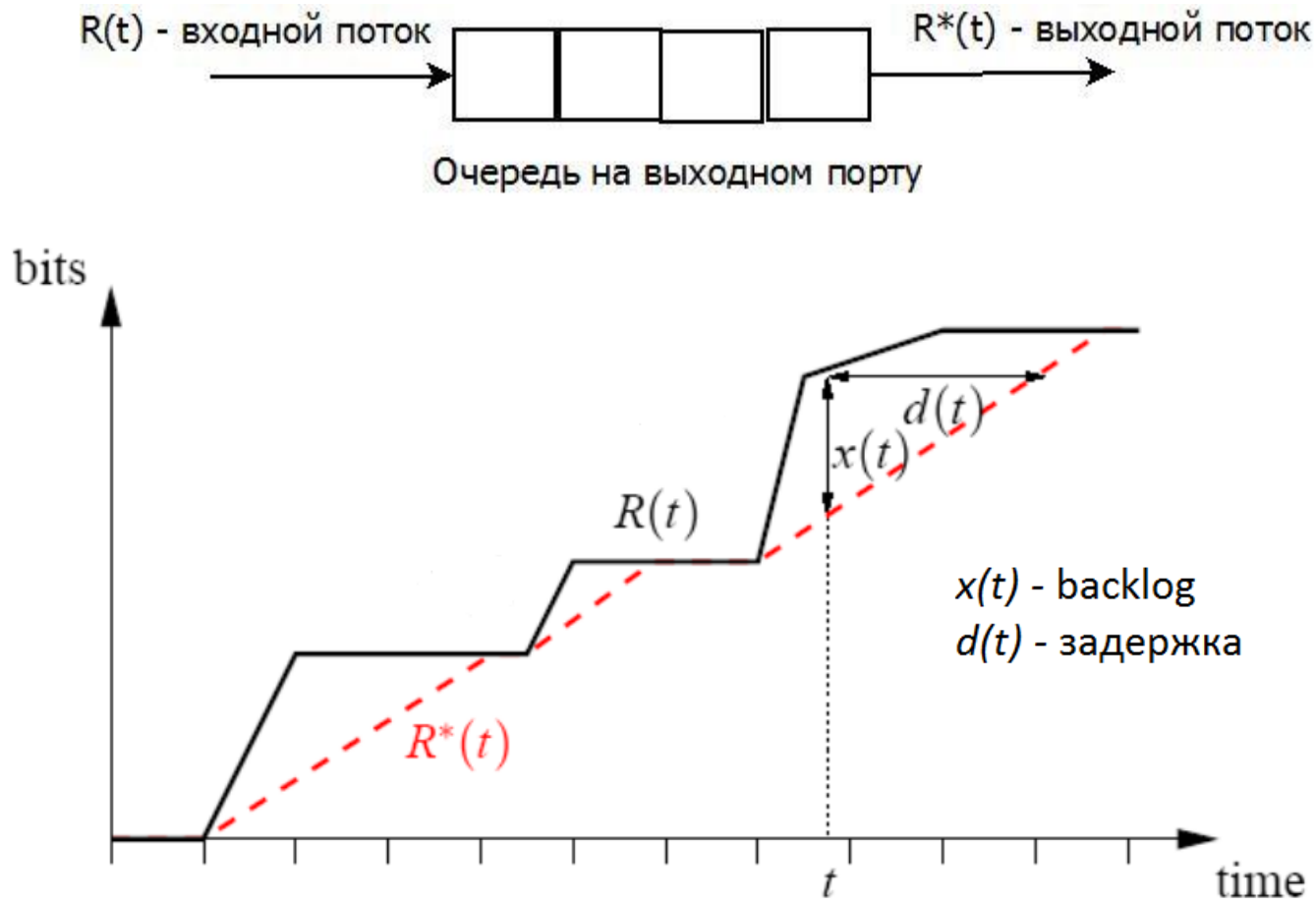
- $R(t)$ – количество бит, прошедших через данную точку сети за интервал $[0, t]$

Оценка длительности передачи кадра

- $R(t)$ – количество бит, прошедших через данную точку сети за интервал $[0, t]$
- $R(t)$ – функция потока на входе буфера
- $R^*(t)$ - функция потока на выходе буфера
- $R(t) \geq R^*(t)$



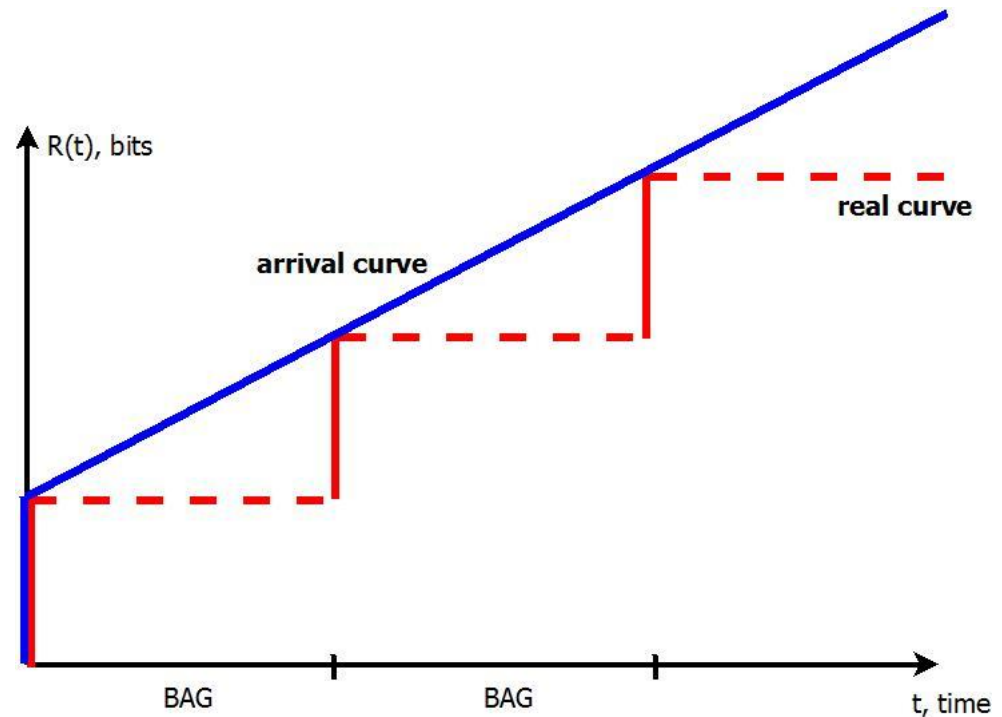
Оценка длительности передачи кадра



$x(t)$ – backlog, соответствует размеру буфера в момент t

Оценка длительности передачи кадра

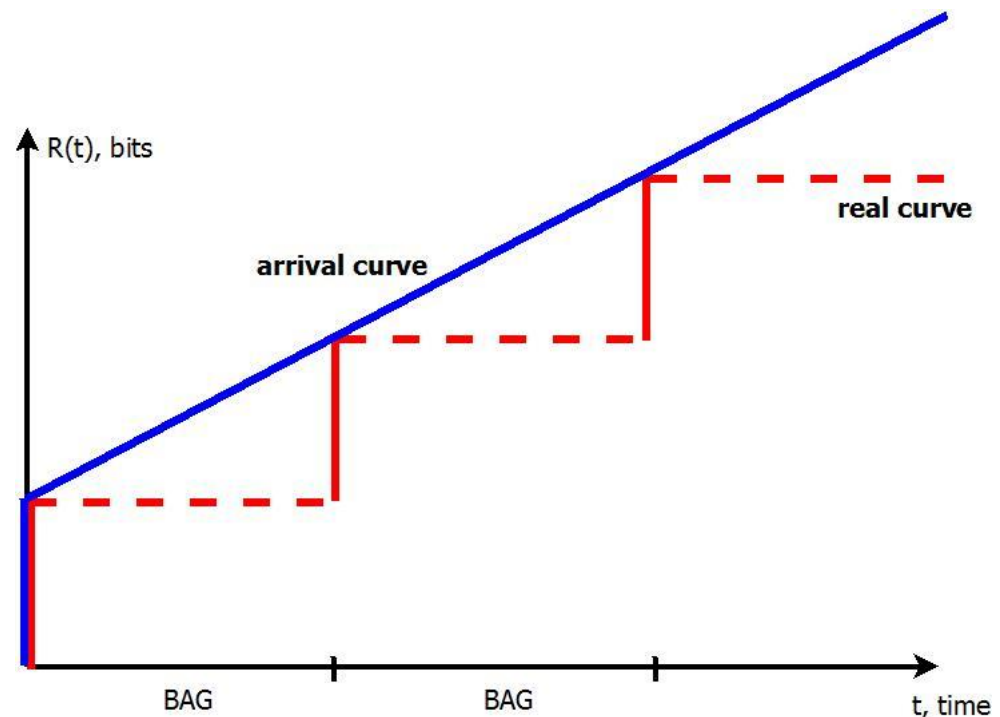
- arrival curve – используется для описания входного потока
 - Кривая не должна быть ниже $R(t)$ – иначе может получиться заниженная оценка
 - Обычно используется линейная функция, как на рисунке



Оценка длительности передачи кадра

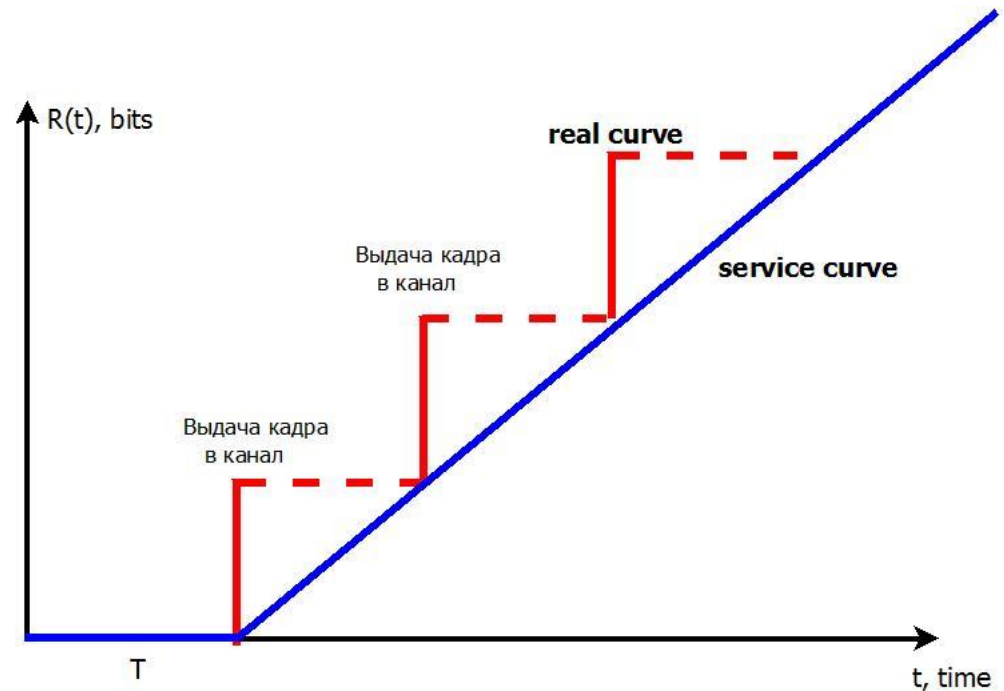
- $a(t) = r \cdot t + l$
 - r – скорость поступления данных
 - l – начальный backlog
- В случае одного виртуального канала AFDX (без учета джиттера):

$$a(t) = (L_{max} / BAG) \cdot t + L_{max}$$



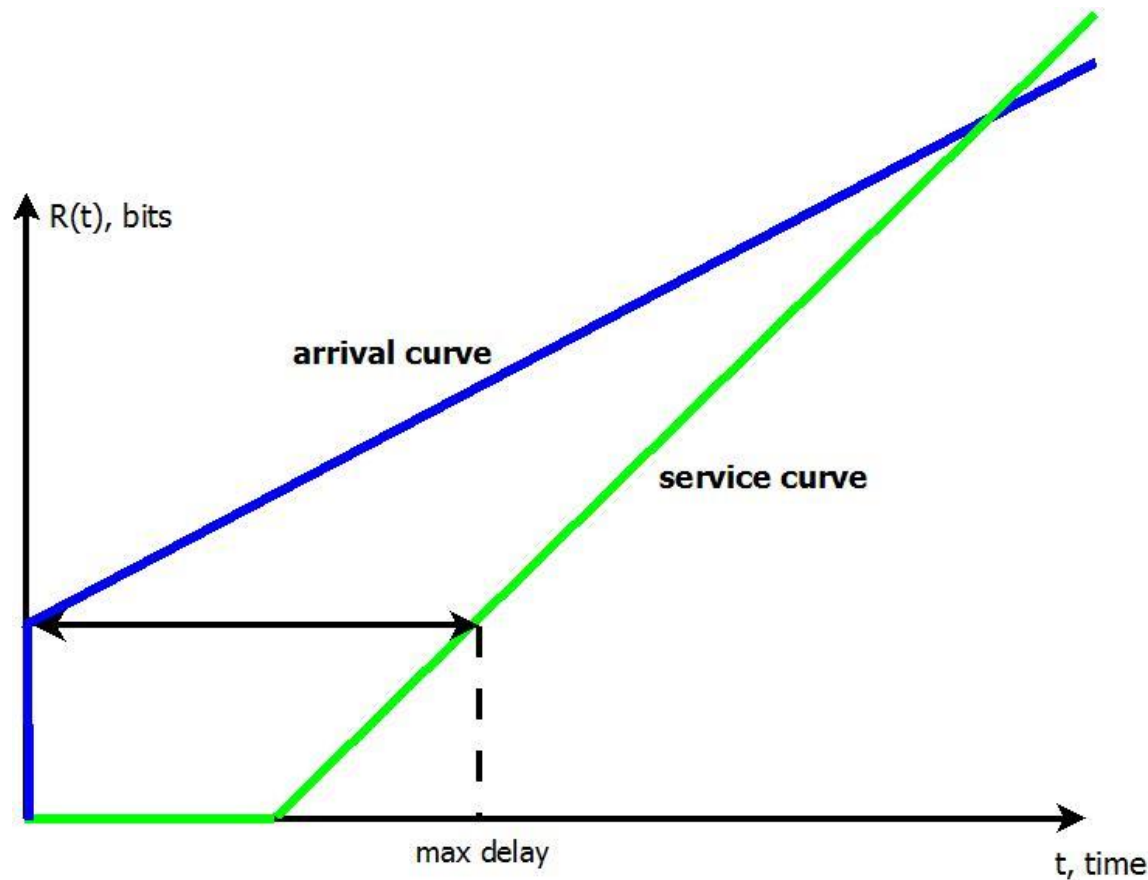
Оценка длительности передачи кадра

- Service curve – используется для описания поведения компоненты системы (в данном случае – буфер со стратегией FIFO)
 - Не должна превышать $R^*(t)$
 - FIFO: $\beta(t) = R[t - T]^+$
 - R – скорость выдачи данных в канал
 - T – задержка выдачи кадра



Оценка длительности передачи кадра

- Использование arrival curve и service curve для получения оценки наихудшей задержки:



Оценка длительности передачи кадра

- Несколько виртуальных каналов на один буфер
 - arrival curve – как сумма соответствующих кривых (аддитивность)

$$a(t) = \sum_{vl} (L_{vl,max} / BAG_{vl}) \cdot t + \sum_{vl} L_{vl,max}$$

- Оценка максимальной задержки для каждого из виртуальных каналов на данном буфере совпадает
- Максимальная задержка соответствует ожиданию передачи всех кадров других виртуальных каналов

Оценка длительности передачи кадра

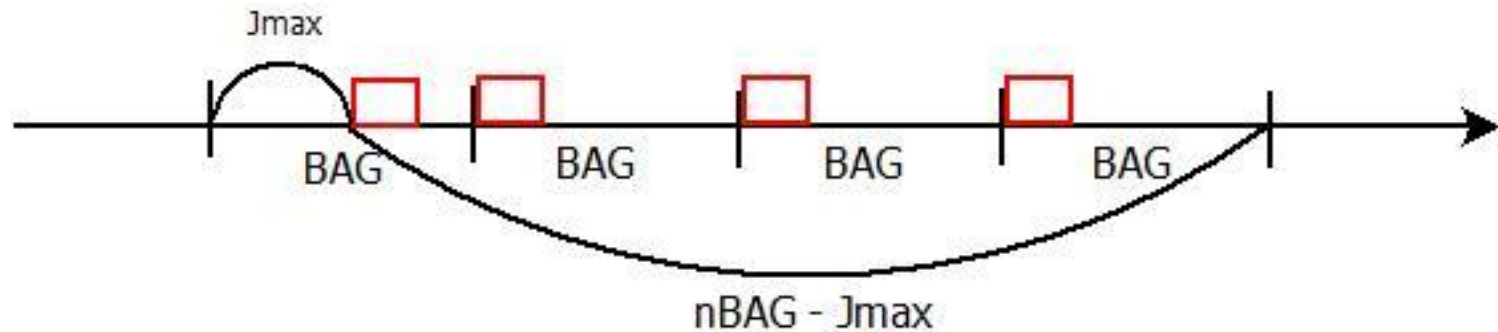
- Учет максимального джиттера в arrival curve

- За $n \cdot BAG - J_{max}$ приходит n кадров

- За время t приходит $\left\lfloor \frac{t + J_{max}}{BAG} \right\rfloor + 1$ кадров (т.к. в момент $t=0$ приходит первый кадр)

- arrival curve: $a(t) = \left(\left\lfloor \frac{t + J_{max}}{BAG} \right\rfloor + 1 \right) \cdot L_{max}$

- линейный вид: $a(t) = \frac{t}{BAG} \cdot L_{max} + L_{max} \left(1 + \frac{J_{max}}{BAG} \right)$



Оценка длительности передачи кадра

- 2 экстремальных случая при прохождении кадра через коммутатор:
 - Пустая очередь, задержка = 0
 - Очередь максимального размера: $\max_delay$ (вычисляется с помощью Network Calculus)
- Джиттер – отклонение между максимальной и минимальной задержкой
- При прохождении через каждый коммутатор максимальный джиттер увеличивается!
- Соответственно, меняется arrival curve для виртуального канала



Специфика FC-RT

- Высокоскоростные оптические каналы (1 Гбит/с)
- Наличие приоритетов сообщений
- Отсутствие BAG – все кадры сообщения выдаются отправителем подряд (если оно не вытеснено высокоприоритетным сообщением)
- Переконфигурирование сети «на лету»

Литература

1. Scharbarg, Jean-Luc, and Christian Fraboul. *Methods and Tools for the Temporal Analysis of Avionic Networks*. 2010.
2. Le Boudec, J.-Y. & Thiran, P. *Network Calculus: A Theory of Deterministic Queuing*. Systems for the Internet, Vol. 2050 of Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag. 2001.
3. Gutiérrez, J. Javier, J. Carlos Palencia, and Michael González Harbour. *Response time analysis in AFDX networks with sub-virtual links and prioritized switches*. XV Jornadas de Tiempo Real, Santander. – 2012.
4. FIXED PRIORITY SCHEDULING OF HARD REAL-TIME SYSTEMS. K.W. Tindell. Ph.D. Thesis, University of York, 1995