

## Исследование возможностей получения гарантированного качества обслуживания при передаче мультимедиа через перегруженные каналы

А.А. Гончаров\*, А.Ю. Ильин\*\*, Ю.А. Семёнов\*

\*Институт теоретической и экспериментальной физики,  
117218, Россия, Москва, ул. Большая Черёмушкинская, 25,  
e-mail: semenov@itep.ru, goncharov@itep.ru

\*\*Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова,  
e-mail: kalend@ripn.net

Поступила в редколлегию 15.08.2006

**Аннотация**—Исследованы возможности обеспечения гарантированного качества обслуживания при передаче мультимедийных данных в условиях высокой перегрузки виртуального канала. Проведены измерения зависимости качества обслуживания (вероятности потери пакетов и PSNR) от параметров алгоритма WRED и значений квот на выходе буферов.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Широкое внедрение IP-телефонии, цифрового ТВ поверх Интернет, P2P ТВ и других мультимедиа приложений ставит проблему обеспечения гарантированного качества передачи в условиях кратковременных и долговременных перегрузок. На сегодня наиболее распространённым способом предотвращения тяжёлых перегрузок является алгоритм WRED. Мы исследовали влияние алгоритма WRED на качество передачи потокового видео: задержку при передаче, потерю и искажения кадров.

Передавалось одновременно три одинаковых видеоролика через тестовый канал, показанный на рис. 1. Видеоролики были закодированы в формат MPEG-4. Транспортным протоколом при передаче видеороликов служил протокол RTP/UDP. Мы попытались на практике оценить влияние параметров WRED и некоторых других конфигурационных параметров канала на качество передачи видеофрагмента (QoS).

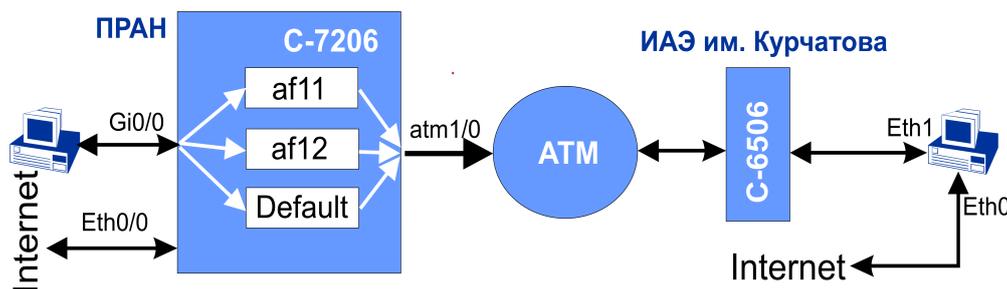


Рис.1 Схема тестового канала.

Данные передавались из Президиума РАН в ИАЭ им. Курчатова. Перед отправкой в ATM канал маршрутизатор применял к пакетам алгоритм WRED:

Табл.1

DSCP[HEX]	TM	TH	qw	ps	Доля в выходной полосе интерфейса
0x28	100	150	0.002	0.1	30%
0x30	32	60	0.002	0.1	20%
0x00	-	75	-	-	10%

DSCP (DiffServ Code Point) - содержимое поля ToS IP-пакета. TM - нижний порог WRED; TH - верхний порог; qw - фактор усреднения, ps - параметр вероятности отбрасывания пакетов при усредненной длине очереди вблизи TH. Под каждый из этих потоков в маршрутизаторе был зарезервирован минимум пропускной способности, составляющий:

- 30% от общей полосы канала для потока с DSCP 10,
- 20% от общей полосы канала для потока с DSCP 12,
- 10% от общей полосы канала для потока с DSCP 0 .

На исходящем интерфейсе маршрутизатора на канальном уровне использовался протокол ATM, максимальная пиковая полоса канала была ограничена 2000 килобитами в секунду. На канальном уровне ATM нами использовался класс VBR-nrt (Variable Bit Rate non-real-time) [1]

```
.....
pvc rbnet 15/64
vbr-nrt 2000 600 10
.....
```

Максимальная пиковая скорость 2000 кбит/сек, средняя ожидаемая скорость 600 кбит/сек, (VBR-NRT, Peak Rate: 2000, Average Rate: 600, Burst Cells: 10). Отсюда следует, что выходная полоса интерфейса составляет 600 кбит/сек. В случае всплесков трафика полоса может достигать 2000 кбит/секунду. Но мы посылаем непрерывный поток пакетов, полоса 2000 кбит/секунду достигается лишь на короткое время в самом начале эксперимента. Это время вычисляется по формуле, приведённой на сайте компании "Cisco"[2]

$$T = (\text{burst cells} \times 424 \text{ bits per cell}) / (\text{PCR} - \text{SCR})$$

$$T = 10 \times 53 \times 8 / (2000000 - 600000) = 0.003 \text{ сек.}$$

Полоса между потоками определяется из следующих соображений: выделяется минимально гарантированная полоса пропускания для потока (см. Табл.1). В случае перегрузки канала поток займёт полосу большую или равную полосе, определённой значением минимально гарантированной полосы. Если в канале есть свободная, не зарезервированная полоса, то она делится поровну между активными потоками .

Полоса (BW) выходного канала 600 кбит/секунду делится следующим образом:

- Поток af11 получает  $BW = 30\% + (100\% - 30\% - 20\% - 10\%) / 3 = 600 \times 0.3 + 80 = 260 \text{ кбит/сек}$ ;
- Поток af12 получает  $BW = 20\% + (100\% - 30\% - 20\% - 10\%) / 3 = 600 \times 0.2 + 80 = 200 \text{ кбит/сек}$
- Поток default получает  $BW = 10\% + (100\% - 30\% - 20\% - 10\%) / 3 = 600 \times 0.1 + 80 = 140 \text{ кбит/сек}$

Средняя скорость отправки каждого из потоков в сеть составляет 230 кбит/секунду. Т.е. На маршрутизаторе задаётся нижний порог полосы пропускания для каждого потока. При полной загрузке канала, когда потоки вынуждены сжаться до отведённой им нижней границы полосы пропускания, их качество сильно деградирует. Если в канале есть нерезервированная полоса, то она распределяется поровну между всеми текущими потоками.

Первый поток проходит без потерь, второй поток слегка теряется, третий поток теряется почти наполовину.

Для передачи видео использовался пакет программ Evalvid 2.1. [3] Незакодированный файл видеоролика занимает очень много места, например видеоролик длительностью 3 минуты в формате YUV[4], рассчитанный для просмотра на маленьком дисплее карманного компьютера, занимает более 600 Мбайт. В аббревиатуре YUV: Y= яркость(Luminance), U=R-Y=разность между красной компонентой и яркостью, V=B-Y= разность между голубой компонентой сигнала и яркостью. Для передачи по сети файлы сжимают кодеком, затем происходит разбивка полученного файла по пакетам, происходит передача пакетов в канал. Чтобы просмотреть видеоролик получатель должен получить пакеты, затем декодировать их. Во время передачи видеоролика по сети интервал следования пакетов может варьироваться, для компенсации этого эффекта на стороне получателя используют входной буфер. Для оценки качества принятого сигнала используют следующие характеристики: процент потери кадров, дисперсия задержек кадров.

Чтобы получить численные значения метрик качества передачи видео ролика, необходима информация об эталонном изображении, а также лог файлы отправителя и получателя. Со стороны отправителя потребуется:

1. видеоролик в не кодированном формате
2. закодированный формат видеоролика
3. временные метки и тип каждого отправленного в сеть пакета.

Со стороны получателя:

1. временные метки и тип каждого принятого из сети пакета.

Имея информацию о потерянных пакетах, записанную получателем, мы можем на стороне отправителя восстановить видеоролик с учётом пропусков кадров, которые были потеряны в сети. Также мы вычисляем зависимость потерь и задержек пакетов от времени.

Потребовалась такая сложная процедура восстановления образа видеоролика, потому что метрика качества видеоизображения предполагает по-кадровое сравнение образа видеоролика с его эталонным видом - прообразом.

## 2. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ИЗМЕРЕНИЯ МЕТРИКИ.

Потерянные пакеты выявляются на основе анализа уникального идентификатора пакета. При измерениях этот идентификатор берётся из IP заголовка. При передаче видео по сети представляет интерес не только количество потерянных пакетов, но и их тип. В стандарте MPEG-4 определено четыре разных типа кадров (I, P, B, S). Так как потеря каждого из этих кадров по-разному влияет на качество изображения, следует различать потери разных типов кадров. При передаче по сети каждый кадр разбит на пакеты.

Потеря пакетов  $PL_T = 100 * \frac{nT_{recv}}{nT_{sent}}$  где T: тип пакетов (I,P,B,S).

$nT_{sent}$  - число отправленных пакетов типа T

$nT_{recv}$  - число полученных пакетов типа T

Потеря кадров  $FL_T = 100 * \frac{nT_{recv}}{nT_{sent}}$   $nT_{sent}$  - число отправленных кадров типа T

$nT_{recv}$  - число полученных кадров типа T

Каждый кадр несёт информацию об изображении. Основные типы кадров (I-кадры) передаются с периодом 1 секунда. Размер I-кадра много больше, чем, размер остальных типов

кадров. В I-кадрах передаётся опорное изображение. Потеря каждого такого кадра влечёт за собой сильные искажения и потерю видеоизображения. Остальные типы кадров отражают изменение I-фрейма, и при их потере, теряются мелкие детали, а не всё изображение.

Часто оказывается, что размер фрейма больше чем MTU - максимально возможный размер пакета в сети (для Ethernet MTU=1500 байт). Следовательно, перед отправкой такой кадр разбивается на несколько пакетов. По пути пакеты могут теряться. Если потеряется пакет кадра, то кодек не сможет восстановить кадр.

Качество видеоизображения - это субъективная характеристика. Метрика качества изображения основана на особенностях восприятия человека. Численная характеристика, основанная на восприятии человека, обозначается: MOS (Mean Opinion Score) и оценивается по пятибалльной шкале.

Численное значение	Качество	Ухудшение изображения
5	отличное	незаметно
4	хорошее	заметно, но не раздражает
3	удовлетворительное	слегка раздражает зрителя
2	плохое	раздражает
1	очень плохое	сильно раздражает

ITU-R таблица оценок качества видеоизображения.

В качестве параметра качества переданного изображения по сравнению с эталонным изображением используют величину Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) [5], которая может быть вычислена по формуле:

$$PSNR(s, d) = 20 \log \frac{V_{peak}}{MSE(s, d)} [dB] = 20 \log_{10} \left( \frac{V_{peak}}{\sqrt{\frac{1}{N_{col} N_{row}} \sum_{i=0}^{N_{col}} \sum_{j=0}^{N_{row}} [Y_s(n, i, j) - Y_d(n, i, j)]^2}} \right)$$

$V_{peak} = 2^k - 1$ , k - битовая глубина цвета

$MSE(s, d)$  - среднеквадратичная ошибка s и d

Значение PSNR вычисляется для каждого кадра. Если видеоролик содержит нескольких сотен или тысяч кадров, то вычисление представляет собой трудоёмкую задачу. Кроме этого очень интересной характеристикой является искажение изображения в процессе трансляции видеоролика по сети. Мы будем сравнивать полученный по сети искаженный образ видеоролика с его прообразом, т.е. вычислим PSNR канала.

Другим вариантом анализа является вычисление значения MOS. Существует общепринятое соответствие между MOS и PSNR.

PSNR[dB]	MOS
>37	5
31-37	4
25-31	3
20-25	2
<20	1

Видео образ длится 25 секунд, с битовой скоростью 200 кбит/сек. С учётом длины заголовков пакетов, скорость передачи в сеть каждого потока составляет 230 кбит/сек. (средняя скорость за время передачи)

Чтобы передать видео образ в сеть, источник разбивает кадры на UDP пакеты длиной 1024 байта, при этом скорость отправки данных в сеть со стороны источника приведена на рис. 2, 3 и 4.

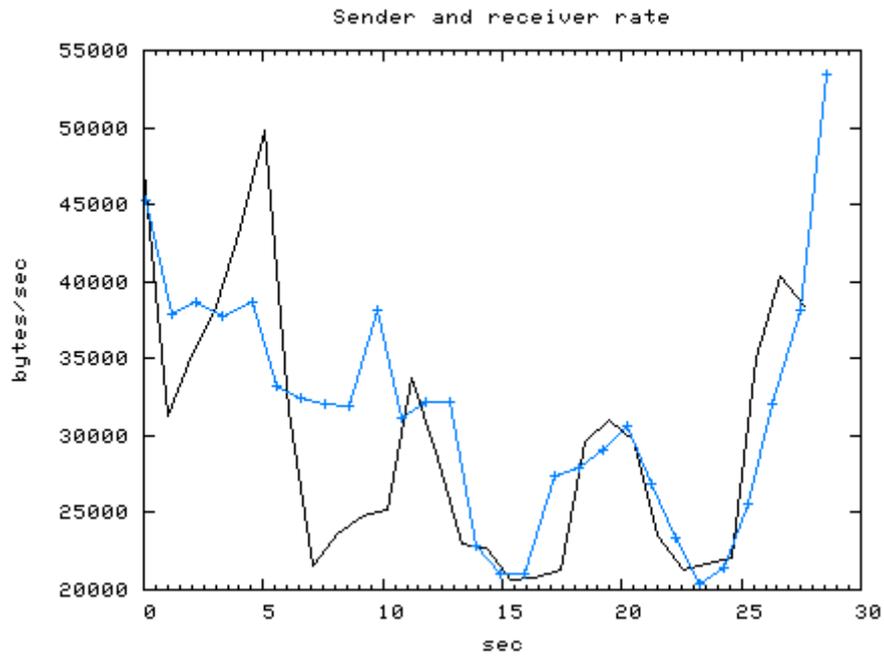


Рис.2 Черным отмечена скорость отправки пакетов с меткой DSCP=af11  
Синим отмечена скорость получения пакетов с меткой DSCP=af11

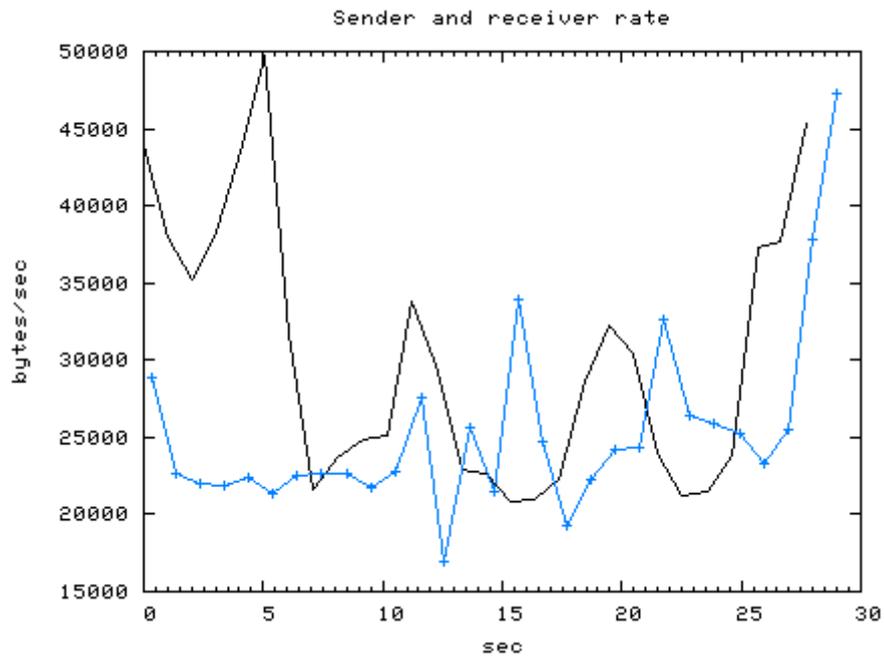


Рис.3 Черным отмечена скорость отправки пакетов с меткой DSCP=af12  
Синим отмечена скорость получения пакетов с меткой DSCP=af12

В таблице приведена статистика по потерям фреймов для каждого из потоков.

Номер потока	L% I-кадров	L% P-кадров	L% общего числа кадров
AF11	0.0	0.1	0.1
AF12	17.2	21.3	21.1
Default	44.8	59.8	59.3

Из таблицы видно, что процент потерь I-фреймов для потока с DSCP af12 и default различается более чем в 2 раза

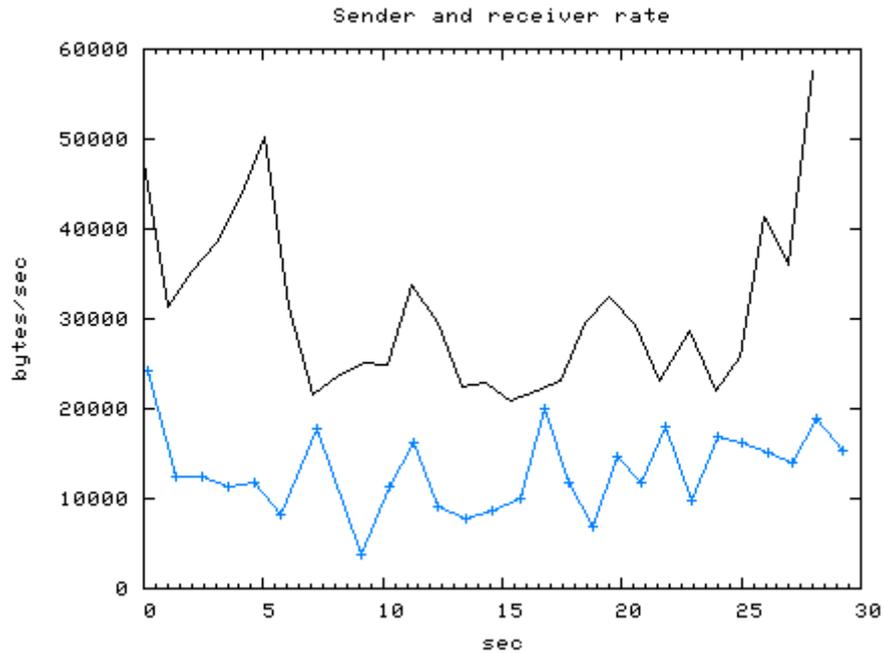


Рис.4 Черным отмечена скорость отправки пакетов default  
Синим отмечена скорость получения пакетов default

При прохождении канала пакеты из потока default сильно теряются, из-за этого мы видим, что доходит почти в два раза меньше фреймов в ед. времени, чем отправляется в сеть. Так и должно быть в соответствии с заданными нами квотами для потоков af11, af12, default.

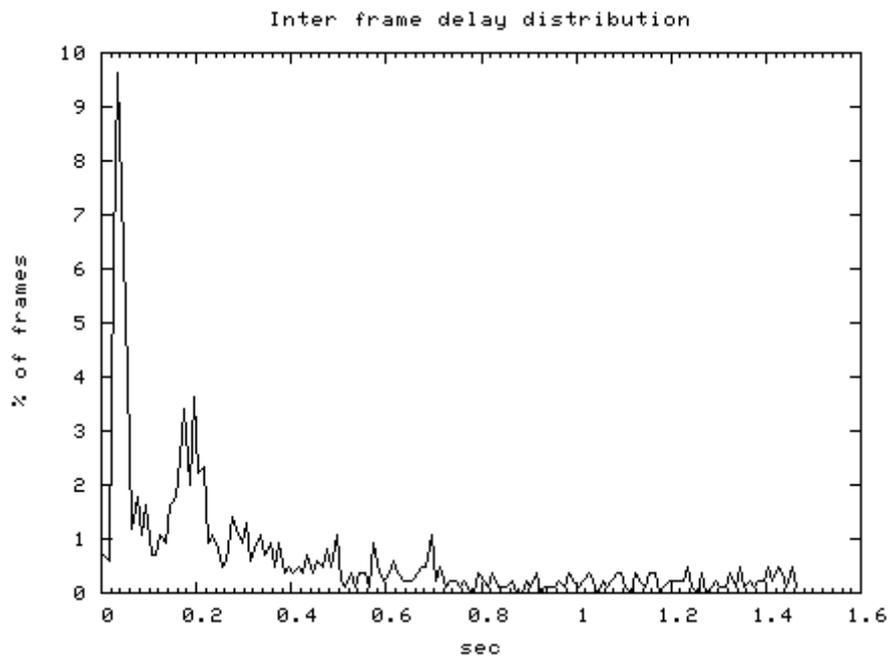


Рис.5 Функция распределения задержек при передаче фреймов DSCP = af11

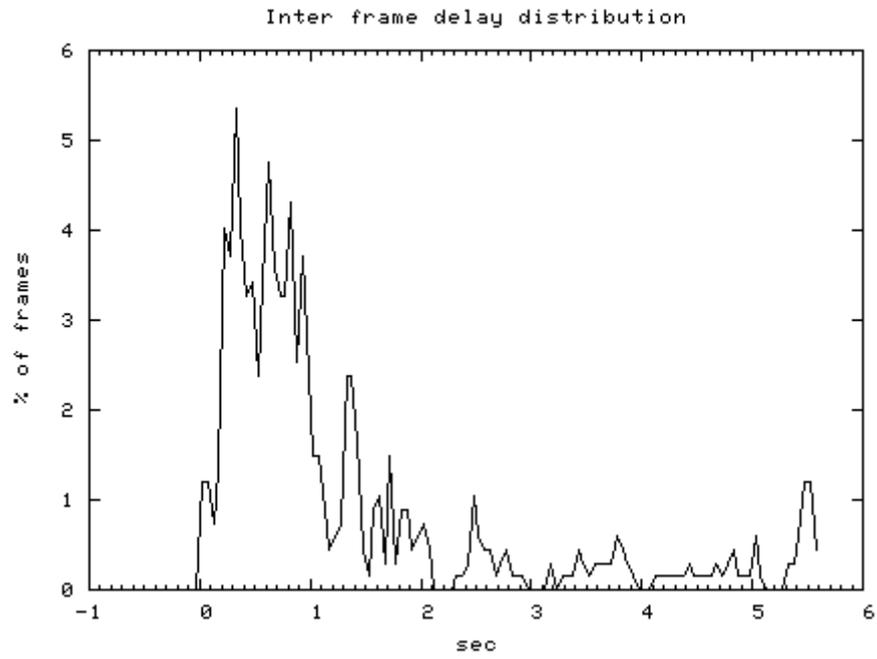


Рис.6 Функция распределения задержек при передаче фреймов DSCP = af12

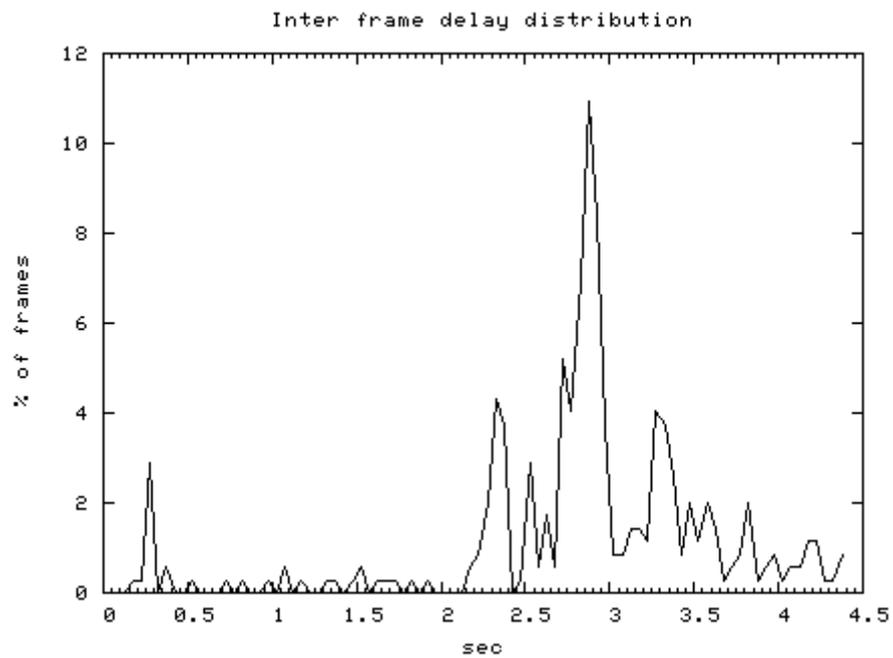


Рис.7 Функция распределения задержек при передаче фреймов default

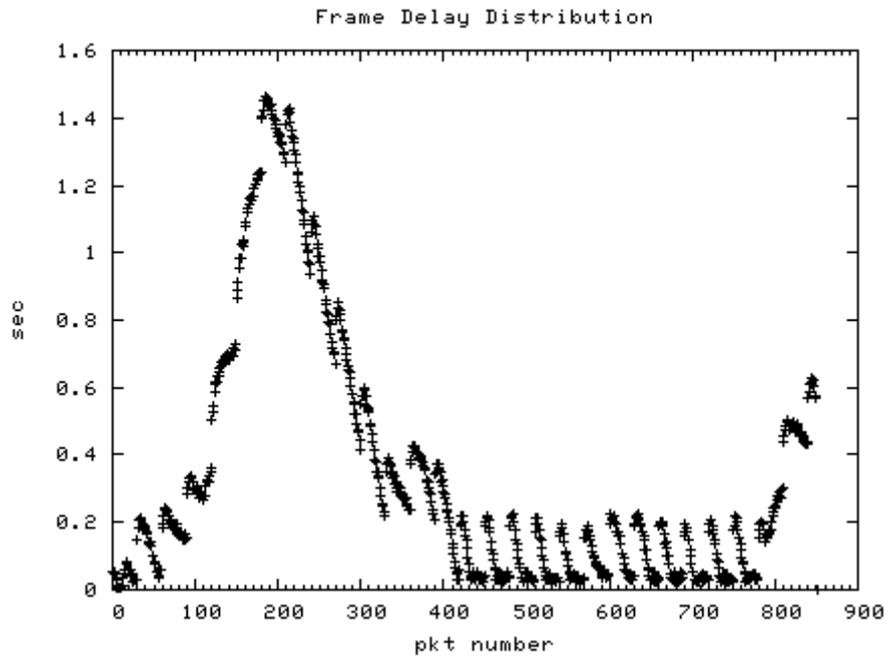


Рис.8 Зависимость задержки при передаче фреймов от номера пакета для DSCP = af11

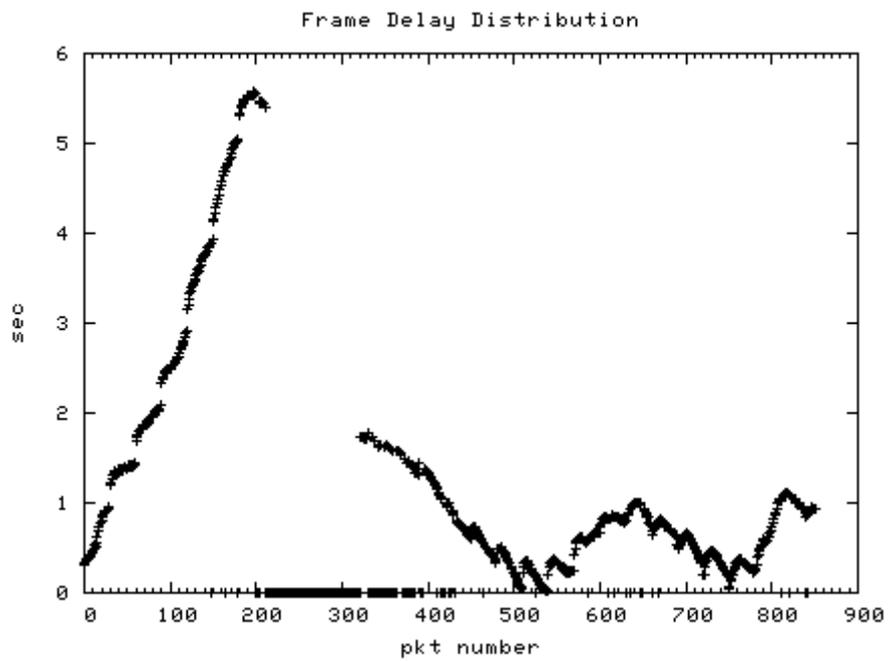


Рис.9 Зависимость задержки при передаче фреймов от номера пакета для DSCP = af12

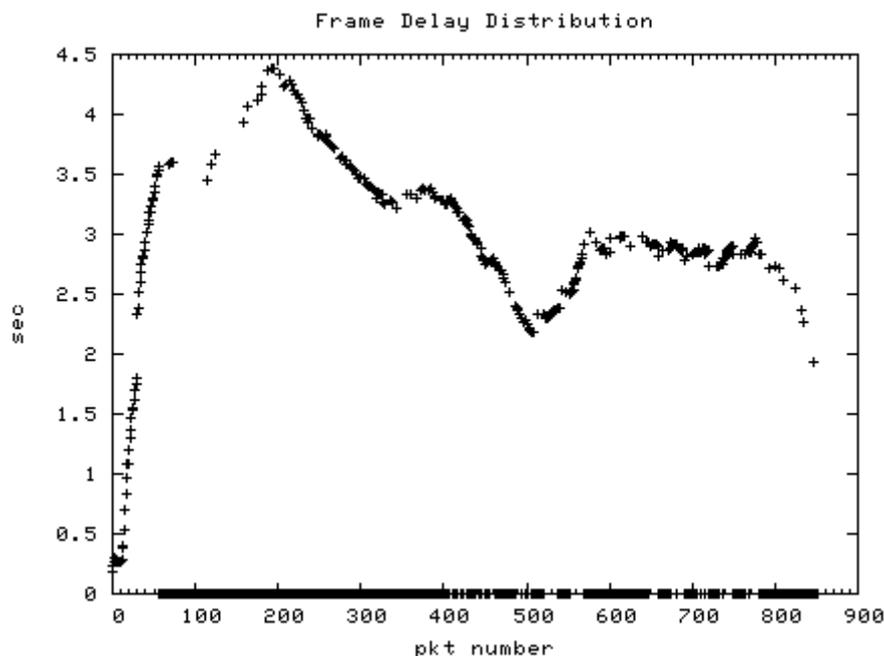


Рис.10 Зависимость задержки при передаче фреймов от номера пакета для DSCP = default

Из рис. 5, 6 и 7 видно, что рост задержки при передаче пакетов обусловлен их буферизацией в маршрутизаторе. В нашем случае в Cisco-7206 формируется три очереди для потоков af11, af12 и default. ТН - значение средневзвешенной длины очереди. Когда достигается значение ТН, то все вновь поступающие пакеты отбрасываются до тех пор, пока средневзвешенное значение очереди не опустится ниже ТН. Реальное число пакетов в очереди в момент перегрузки может быть и несколько больше ТН [6],[7]. В стационарном режиме перегрузки, значение текущей длины очереди для потока меньше либо равно ТН. Исходя из этих соображений, можно оценить среднюю установившуюся длину очереди. Для потока default, алгоритм WRED не работает, поэтому потери в этом потоке начнутся лишь, когда заполнится пакетами весь буфер (75 пакетов).

Чем больше пакетов находятся в очереди, тем больше будет время доставки пакета. Задержку можно регулировать, увеличивая квоту полосы для потока. Другой способ ограничить задержку - задать низкое значение порога ТН в настройках алгоритма WRED, тем самым заставить часть пакетов теряться принудительно [6],[7]. Для задания квоты полосы на маршрутизаторе мы использовали CBWFQ, а не LLQ, так как LLQ предполагает присвоение потокам приоритетов, и в этом случае менее приоритетные потоки в момент перегрузки совсем не будут передаваться. CBWFQ - позволяет задать распределение полосы между потоками, и какова бы ни была перегрузка, каждый поток гарантированно получит часть полосы см. [8]. Значения задержки можно оценить из следующих соображений. Алгоритм WRED следит за длиной каждой из очередей. Когда канал перегружен, то пакет либо помещается в конец очереди либо отбрасывается. Если пакет помещается в конец очереди, то ему придётся ждать время равное  $\tau_D$ , пока выходной интерфейс не отправит в сеть все пакеты, стоящие в очереди до него. Кроме того, существует задержка передачи пакета, связанная с прохождением пакета через другие узлы канала (АТМ, Cisco-6506, переключатель, машина-получатель в ИАЭ), эта задержка составляет для пакетов длиной 1024 байта в отсутствии перегрузки 9.6мс.

$\tau_D = \frac{P_{len}}{\mu} B$ ,  $P_{len}$  - средняя длина пакета,  $\mu$  - полоса, отведённая потоку,  $B$  - число пакетов в буфере.

Когда канал стационарно перегружен,  $V \sim TH$ . Оценим максимальное значение задержки для варианта, показанного на рис.6.  $\mu = 200000$  бит/с,  $Pen = 1024$  байт = 8192 бита,  $V = 60$  пакетов. ( $V = TH$  для потока af12) Следовательно, для потока AF12  $\tau_D = \frac{Pen}{\mu} V = 2.45 [sec]$

Для потока default максимальные значения задержки равно  $\tau_D = 4,3$  сек ( $\mu = 140000$  бит/с,  $V = 75$  пакетов). По умолчанию на маршрутизаторе максимальная длина очереди для потока default = 75 пакетов.

Для потока AF11 получилась следующая зависимость для PSNR.

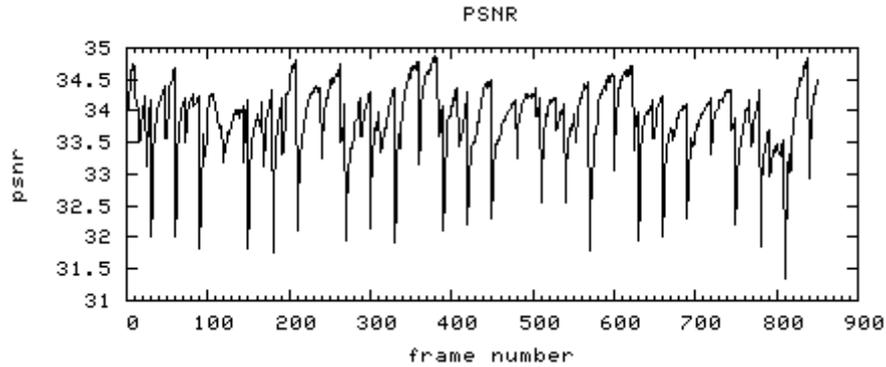


Рис.11 PSNR для DSCP = af11

PSNR для потока AF11 дает усредненную оценку MOS=4. Ухудшение качества сопряжены не с потерями в канале, а с особенностями перекодирования из формата YUV в MPEG-4. Для AF12 картина несколько хуже.

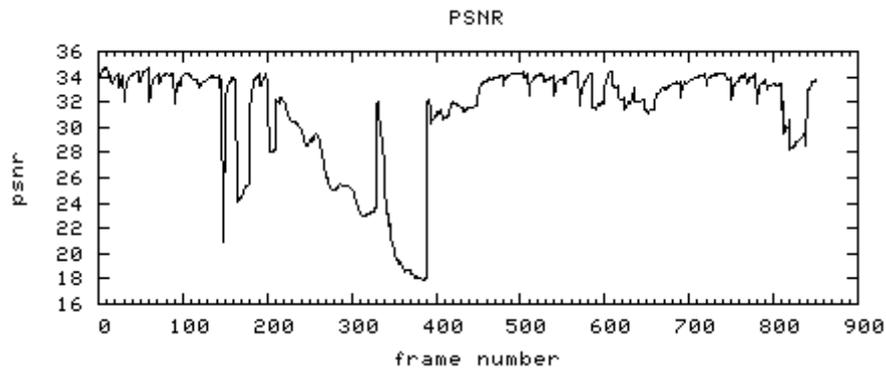


Рис.12 PSNR для DSCP = af12

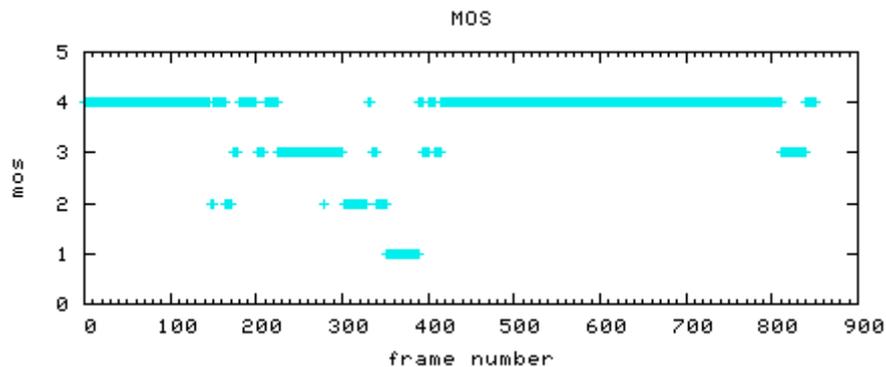


Рис.13 MOS для DSCP = af12

Для потока AF12 оценка MOS приближается к 3. А для потока default качество уже не может быть признано удовлетворительным

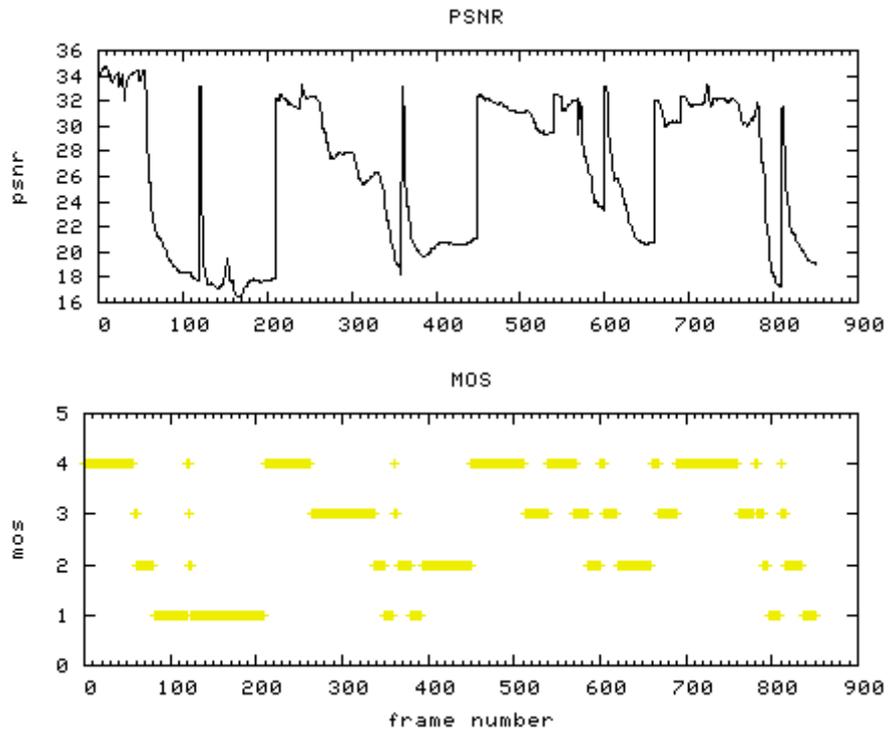
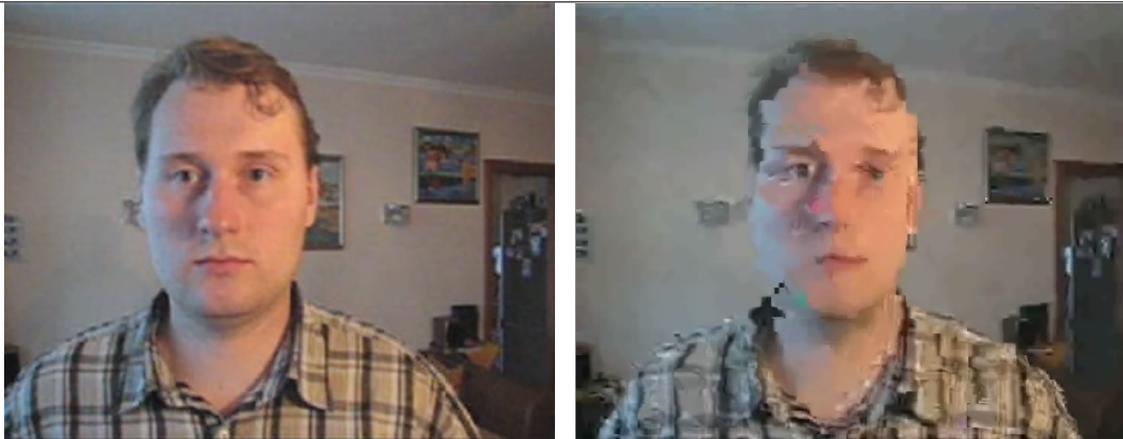


Рис.14 PSNR(сверху)и MOS(снизу) для DSCP = default

Усредненное значение MOS для потока default лежит в области 2.

Исходный кадр

Искажённый кадр



На рисунке приведён кадр из исходного видео фрагмента и искажённый кадр из потока af12. Это был единственный сильно искажённый в потоке af12. Для потока default сильные искажения наблюдаются на протяжении всего видеофрагмента, а в некоторые моменты изображение не только было сильно искажено, но и застывало на несколько секунд. Из полученных данных видно, что даже в условиях перегрузки канала современное сетевое оборудование позволяет получить достаточно высокое качество при доставке мультимедиа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. [http://www.cisco.com/en/US/tech/tk39/tk51/technologies\\_tech\\_note09186a0080102a42.shtml](http://www.cisco.com/en/US/tech/tk39/tk51/technologies_tech_note09186a0080102a42.shtml)
2. [http://www.cisco.com/warp/public/121/atm\\_vbrshape.shtml](http://www.cisco.com/warp/public/121/atm_vbrshape.shtml)
3. <http://www.tkn.tu-berlin.de/research/evalvid/>
4. <http://www.fourcc.org/fccyuv.htm>
5. "Cross-Layer Optimization of OFDM Transmission Systems for MPEG-4 Video Streaming", J. Gross, J. Klaue, H. Karl and A. Wolisz
6. "Random Early Detection Gateways for Congestion Avoidance", Floyd S., Jacobson V., IEEE/ACM Transactions on Networking, pp.397- 413, August 1993.
7. "Исследование влияния параметров WRED на осцилляции длин очередей в маршрутизаторе", <http://www.jip.ru/2006/153-159.pdf>
8. [http://www.cisco.com/en/US/products/sw/iosswrel/ps1830/products\\_feature\\_guide09186a0080087b13.html](http://www.cisco.com/en/US/products/sw/iosswrel/ps1830/products_feature_guide09186a0080087b13.html)