

ОСОБЕННОСТИ ВИДЕОГРАФИКА В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ

Е.С. Сагатов^{1*}, А.М. Сухов^{2*}, А.А. Семенов^{3*}

1. e-mail: sagatov@ya.ru, тел. +7 908 4 21 51 81
2. д.т.н., профессор, e-mail: amskh@yandex.ru, тел. +7 927 7 85 67 48
3. e-mail: semenof_aa@mail.ru, тел. +7 908 4 08 47 11

*. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева, г.Самара

Краткая аннотация

В работе показано, что для значительного повышения качества передачи видео в беспроводной сети необходимо выполнить два обязательных пункта по модернизации структуры видео потока: дополнить проигрыватель на приемной стороне функцией автоматического отбрасывания дублирующихся RTP пакетов; сервер трансляции потокового видео должен дублировать пакеты, содержащие данные ключевых кадров. Для установления зависимости качества передаваемого видео от сетевых параметров были экспериментально найдены и проанализированы коэффициенты модели для беспроводных сетей WiFi и 3G, кодеков MPEG-2 и MPEG-4 (DivX). Для расчета значений коэффициентов была разработана специальная экспериментальная методика, позволяющая также оценить эффект искажения ключевых кадров.

Ключевые слова:

Беспроводные сети, субъективная оценка качества видео изображения, процент потерь пакетов, вариация задержки пакетов, сетевой джиттер, сетевой сниффер Wireshark, VLC media player, трансляция видео, RTP поток.

Введение

Мобильные решения в области телекоммуникаций все более настойчиво входят в повседневную жизнь. Современные сотовые телефоны уже позволяют выполнять те же задачи, что и обычные компьютеры. Ноутбуки и нетбуки дают невероятную степень мобильности. Благодаря их компактности и наличию встроенных адаптеров высокоскоростных беспроводных сетей 3G, WiFi, а зачастую и WiMAX можно быть на связи где угодно и когда угодно. Согласно данным Cisco VNI [1] ежегодный прирост Интернет трафика на беспроводных устройствах составляет более 250%. К 2013 году количество данного трафика увеличится в 66 раз по сравнению с 2008 годом и составит 5,4% от всего IP-трафика в Интернет. К 2013 году различный видео контент будет составлять 64% всего трафика беспроводных сетей в мире.

Существует серьезное препятствие для повседневного использования видео сервисов в беспроводных сетях: современное качество связи оставляет желать лучшего. Качественные характеристики беспроводных сетей: большой процент потерь пакетов и вариация задержки (сетевой джиттер) делают их малопригодными для передачи данных в режиме реального времени, так как мультимедийный трафик чрезвычайно чувствителен к подобным искажениям. Пакеты потокового видео теряются при передаче по сети, изменяют порядок следования из-за значительной вариации задержек пакетов. На получаемом видеоизображении появляются множественные артефакты, происходит рассинхронизация потока, что приводит к искажениям изображения, а иногда и к полной остановке воспроизведения видео [2, 3].

Методика паспортизации пакетных сетей в рекомендации RFC-2544 [4] определяет следующие основные параметры качества сети: пропускная способность B , задержка при передаче пакета D , сетевой джиттер

(вариация задержки) j , количество потерянных пакетов p , количество пакетов с ошибками.

Идея субъективного тестирования (MOS) состоит в том, что видео, закодированное одним из кодеков MPEG-2, MPEG-4 или Windows Media Video 9, передается через сеть Интернет и беспроводную сеть стандартов WiFi, 3G или WiMAX. Полученное после передачи видео, демонстрируется группе экспертов, которые выставляют оценки, основываясь на своих впечатлениях от качества. Существует много методов демонстрации последовательностей и сбора оценок, некоторые из них описаны в рекомендациях ITU [5]. К сожалению, в основном они рассчитаны на сравнение видео в телевизионном формате, и не очень удобны для проведения тестирования на персональном компьютере [6].

В настоящей работе рассматривается проблема адаптации современных алгоритмов кодирования и передачи видео для беспроводных сетей, таких как 3G, WiFi и WiMAX [7], а также для других сетей с плохими характеристиками качества. В работах [8, 9] было показано, что субъективная оценка качества видео, равно как и сетевых параметров, имеет градацию "хорошо" (Good), "приемлемо" (Acceptable) и "плохо" (Poor) (GAP). Такое описание [10] помогает понять качественные зависимости, возникающие при сетевой трансляции видео и сделать первичные численные приближения. В работе [11] искажения видео из-за потери пакетов оцениваются с помощью модели потерь-искажений.

В настоящей работе сделана попытка найти и сравнить численную зависимость качества видеоизображения от сетевых параметров. Отличительной особенностью нашего подхода является то, что указанная зависимость описывается простой математической моделью, что позволяет сравнивать численные значения коэффициентов. На основании подобного анализа можно найти не только наиболее существенные факторы,

влияющие на качество видео, но также и сопоставить между собой различные кодеки.

В работе учитывается различие между искажениями, которые вносят повреждения ключевых и промежуточных кадров. Ключевым называется кадр, который содержит полную информацию об изображении и может быть восстановлен без привлечения дополнительных данных. Все остальные кадры можно назвать промежуточными, так как они кодируют различие между опорными кадрами и текущим кадром. Для кодека MPEG4 кодируется разница между опорными, т.е. ранее сохраненными кадрами, общим числом до 32-х и текущим кадром. Степень сжатия ключевого кадров меньше, чем у обычного кадра, а размер в несколько раз больше. В данной работе будет дано численное сравнение, описывающее влияния сетевых ошибок, произошедших на ключевых и промежуточных кадрах, для кодеков MPEG-2 и MPEG-4.

Предпосылки для моделирования

При передаче видео по сети качество связи ухудшается в зависимости от характеристик сетевого соединения. Качество передаваемого видео по шкале MOS в зависимости от сетевых параметров может быть описано универсальной функцией $Q_{mos}(p, j, D, B)$. Эта функция может быть разложена в степенной ряд по сетевым параметрам, при этом можно ограничиться линейными членами.

В докладе на конференции TERENA 2005 [12] было показано, что для фиксированной скорости видео потока достаточно рассмотреть только члены разложения, описывающие линейную зависимость от двух переменных, потерь пакетов и сетевого джиттера:

$$Q_{mos} = Q_{ideal} - \alpha p - \beta j \quad (1)$$

где

- Q_{ideal} - максимальное качество видео для данного кодека, баллы от нуля до пяти;
- p - процент потерь пакетов, %;
- j - сетевой джиттер (вариация задержки) в момент ошибки, сек.;
- Q_{MOS} - качество принимаемого видео, баллы от одного до пяти;
- α , β - коэффициенты модели, которые следует определять экспериментально.

Для проведения исследований была разработана единая видео последовательность, которая обрабатывалась кодеками MPEG-4 (DivX), MPEG-2 и Windows Media Video 9 с постоянным битрейтом 256 кбит/с.

Основная задача, поставленная в настоящей работе, это выявление влияния ключевых кадров на качество получаемого видео изображения. Поэтому отдельно вычисляются коэффициенты α^k и β^k для потока с повреждением ключевых кадров, а также α^w и β^w для последовательностей без повреждения ключевых кадров. Например, α_{DivX}^k будет обозначать усредненный коэффициент, который характеризует ухудшение качества видео, закодированного кодеком MPEG-4 (DivX), если повреждение пришлось на ключевой кадр. Далее в работе будут найдены и сопоставлены α_{DivX}^k и α_{DivX}^w , а также α_{Mpeg2}^k и α_{Mpeg2}^w . Сравнение будет проводиться не на основе качественных характеристик. Сопоставляться будут численные значения коэффициентов.

Планирование эксперимента

Для нахождения коэффициентов уравнения (1) нами был разработан и проведен ряд экспериментов. Закодированные кодеками MPEG-4 (DivX), MPEG-2 и Windows Media Video 9 видео файлы, пересылались на ноутбук, подключенный к беспроводной сети стандартов WiFi, WiMAX или 3G. На

ноутбуке проводилась запись получаемого видео в файл, параллельно записывался сетевой трафик на уровне пакетов при помощи сетевого sniffера Wireshark. Таким образом, по полученному видеоизображению можно установить качество видео по шкале *MOS*, а по сетевым логам – параметры сетевого соединения.

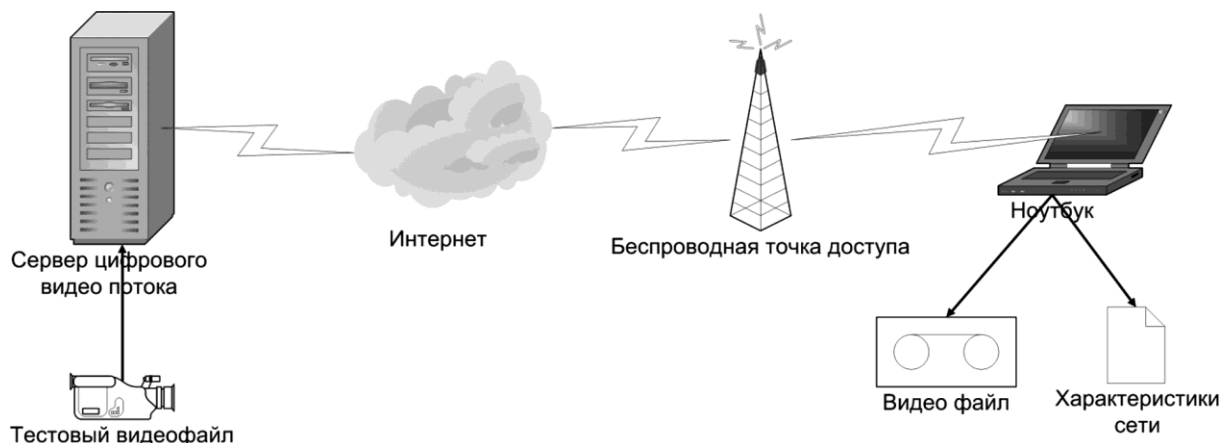


Рисунок 1. Схема проведения эксперимента

Для проведения и анализа экспериментов (см. Рисунок 1) применялось программное обеспечение:

1) VLC media player [13] – использовался в качестве программного видеосервера и видеоплеера с возможностью записи получаемого по сети видео в файл на ноутбуке.

2) The Wireshark Network Protocol Analyzer [14] – с его помощью на ноутбуке записывался весь сетевой трафик, а затем анализировался.

3) VirtualDub [15] – с помощью данной программы производился покадровый анализ видеоизображения для вычисления *MOS*.

4) AviSynth 2.5 [16] – с его помощью в программе VirtualDub анализировалось видео, закодированное WMV кодеком. Данный кодек работает, используя технологию DirectShow, а не VFW (Video For Windows), и не может быть напрямую открыт в VirtualDub.

Все записанные в ходе экспериментов видеофрагменты и сетевой трафик опубликованы на сайте компании НПЦ «Интернет ТВ» [17].

Для сетей WiFi, WiMAX и 3G эксперименты будут выглядеть одинаково, меняется лишь сетевое оборудование. На Рисунке 1 представлена схема проведения эксперимента.

Для эксперимента был подготовлен один видеоряд с различными типами изображения: статичное, со слабым движением, с быстрым движением, с изменением яркости. Затем видеоряд был закодирован с использованием кодеков MPEG-4 (DivX), MPEG-2 и Windows Media Video 9. При этом установлены следующие параметры видео:

- разрешение картинки - 320 x 240 пикселей;
- частота кадров – 24 кадр/с.;
- битрейт 256 кбит/с;
- качество – максимальное.

Файлы исходного видео также опубликованы на сайте компании НПЦ «Интернет ТВ» [17].

В качестве программы для трансляции видео по сети использовался программный продукт Videolan. Данная программа запускалась с сервера, подключенного к сети Интернет с реальным IP адресом.

На компьютере, который принимал видео, был установлен VLC media player, а также сетевой сниффер Wireshark, записывающий весь получаемый по сети трафик в момент передачи видео. VLC media player был настроен на одновременное отображение принимаемого видео на экран и сохранение его в видеофайл. Таким образом, при проведении каждого опыта записываются два файла для дальнейшего анализа: видеофайл и файл сетевого трафика.

Для проведения экспериментов использовались – локальная сеть СГАУ (WiFi), самарские сегменты сети операторов связи: Мегафон (3G), Билайн (3G) и Метромакс (WiMAX), которые бесплатно предоставили оборудование и технические возможности для тестовых испытаний.

Современные точки доступа WiFi соответствуют стандарту IEEE802.11b/g. Обычной для них является настройка, при которой клиенты, находящиеся в непосредственной близости от точки, используют более скоростной стандарт IEEE802.11g (до 54 Мбит/с), а клиенты, находящиеся в удалении, автоматически переводятся на стандарт IEEE802.11b (до 11 Мбит/с). Как правило, клиенты общедоступных сетей WiFi находятся на расстоянии от точки доступа и пользуются стандартом IEEE802.11b. Именно в этом стандарте проводились измерения.

При экспериментах с WiMAX сеть была настроена по стандарту 802.16d, принятом для фиксированной связи.

Эксперименты на 3G сетях местных операторов Мегафон и Билайн проводились на оборудовании стандарта UMTS, которое повсеместно эксплуатируется данными операторами.

Обработка результатов экспериментов

Для сети стандарта WiFi характерно периодическое ухудшение характеристик сети, соответственно изображение ухудшается именно в определенные моменты. Порядок анализа всех полученных видеофрагментов и записей сетевого трафика одинаков. Далее описан процесс анализа одного из видеофайлов и соответствующего ему файла сетевого трафика в моменты ухудшения качества видео:

1) Программой VirtualDub открывается видеофайл (<http://stream.ip4tv.ru/wireless/WiFi/test1/1divx.mp4>), полученный в результате опыта. Ищется кадр, предшествующий искаженному кадру, на Рисунке 2 видно, что это кадр 143, который отображается на 5923 мс видеоряда. Аналогично находится последний искаженный кадр. В описываемом случае это 171 кадр, показываемый на 7083 миллисекунде. Таким образом, вычитая из времени начала искажения видео время

окончания получится длительность искажения, составляющая 28 кадров или 1160 мс.

2) В сетевой сниффер Wireshark загружаются соответствующие логи сети (<http://stream.ip4tv.ru/wireless/WiFi/test1/1divx.pcap>), записанные в момент трансляции данного видео. По умолчанию Wireshark распознает передаваемые видео файлы как пакеты UDP. Необходимо конкретизировать тип пакетов, выбрав пункт RTP. Для этого типа пакетов Wireshark имеет встроенный анализатор, в нем выбирается нужный поток для более подробного анализа. В анализаторе (Рисунок 3) приведен список всех пакетов и красным помечены места, где были потеряны пакеты.

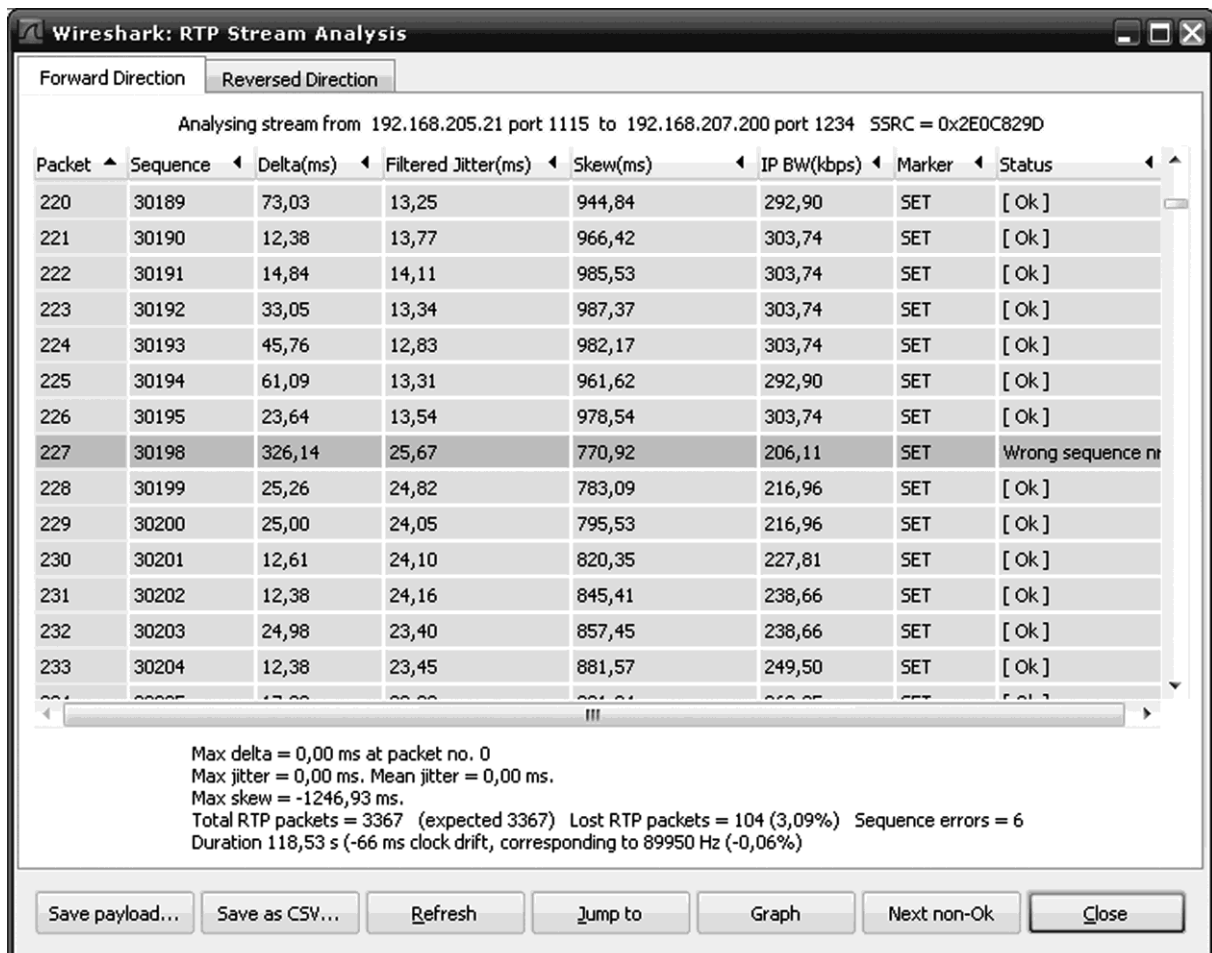


Рисунок 3. Ошибка последовательности пакетов RTP

Также указаны статистические данные по межпакетному интервалу и джиттеру. Из столбца Sequence видно, что приняты пакет с номером 30195 и пакет с номером 30198, а между ними два пакета были потеряны.

3) Основная проблема анализа – как соотнести файл сетевых логов с видеозаписью. Для этого в логе пакетов (Рисунок 3) ищется пакет (226), после которого произошла ошибка. По отношению к началу записи логов этот пакет поступил на 10,878914 секунде (Рисунок 4).

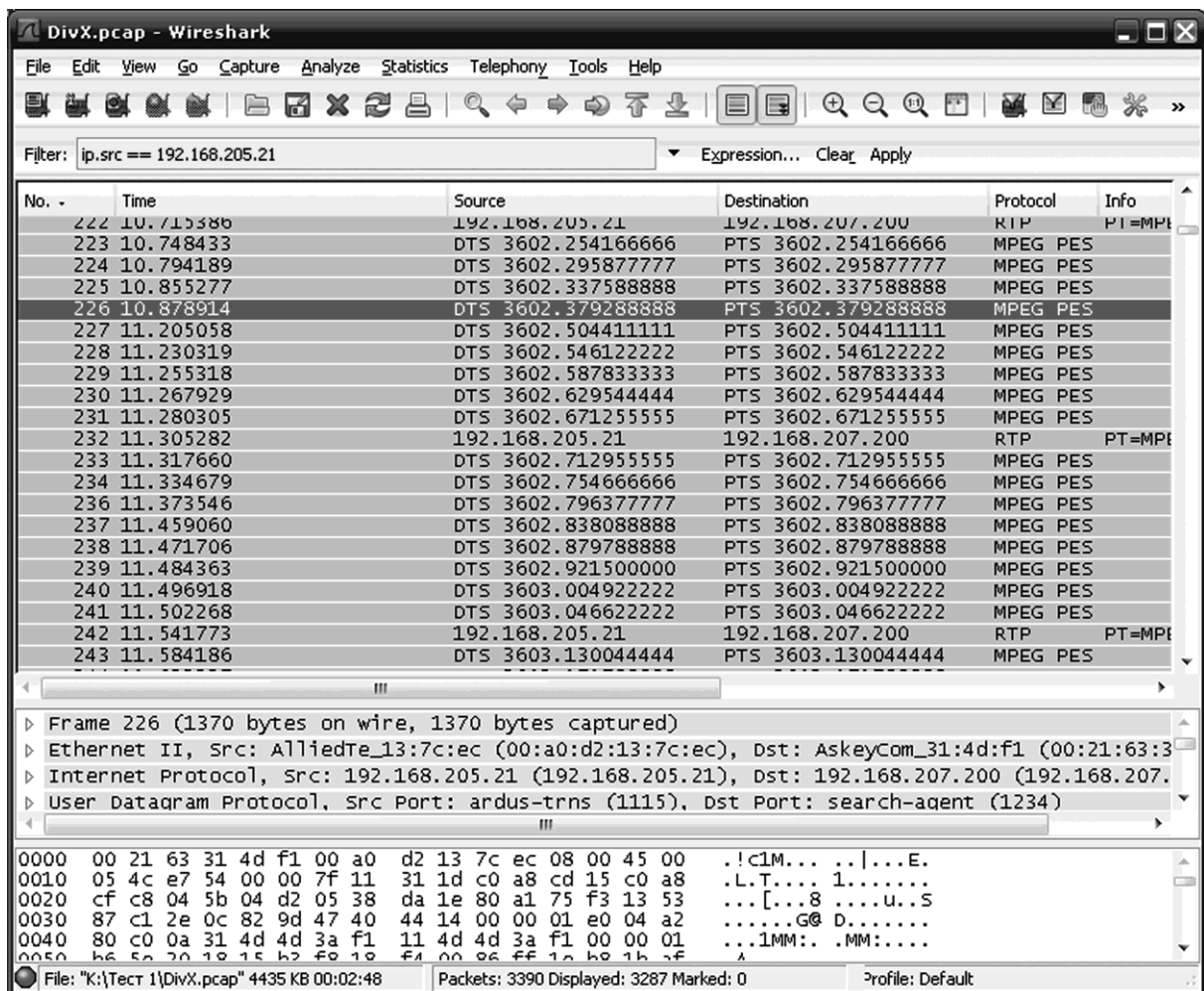


Рисунок 4. Запись сетевого трафика

4) В пункте 1 было найдено, что в видеоряде искажение произошло на 143 кадре, который отображался на 5923 мс видеоряда. Таким образом, искомое соотношение определено.

5) В пункте 1 установлено, что длительность искажений в видеоизображении 1160 мс. Соответственно от 226 кадра, пришедшего на 10,878914 секунде, отсчитывается 1160 мс. Получаем 12,038914 с. Последний пакет, который пришел до 12,038914 секунды это пакет 253.

6) Для получения достоверных статистических расчетов нами было принято, что длина последовательности для анализа должна быть кратна 100 пакетам. Теперь не сложно подсчитать процент потерянных пакетов.

7) В анализаторе RTP пакетов также указан межпакетный интервал и джиттер для каждого пришедшего пакета.

Другая важная задача, возникающая при обработке результатов экспериментов, это оценка качества видео по шкале MOS. Алгоритм оценки следующий:

1. На первом искаженном кадре видео и последнем устанавливаются метки в программе VirtualDub (Рисунок 2).

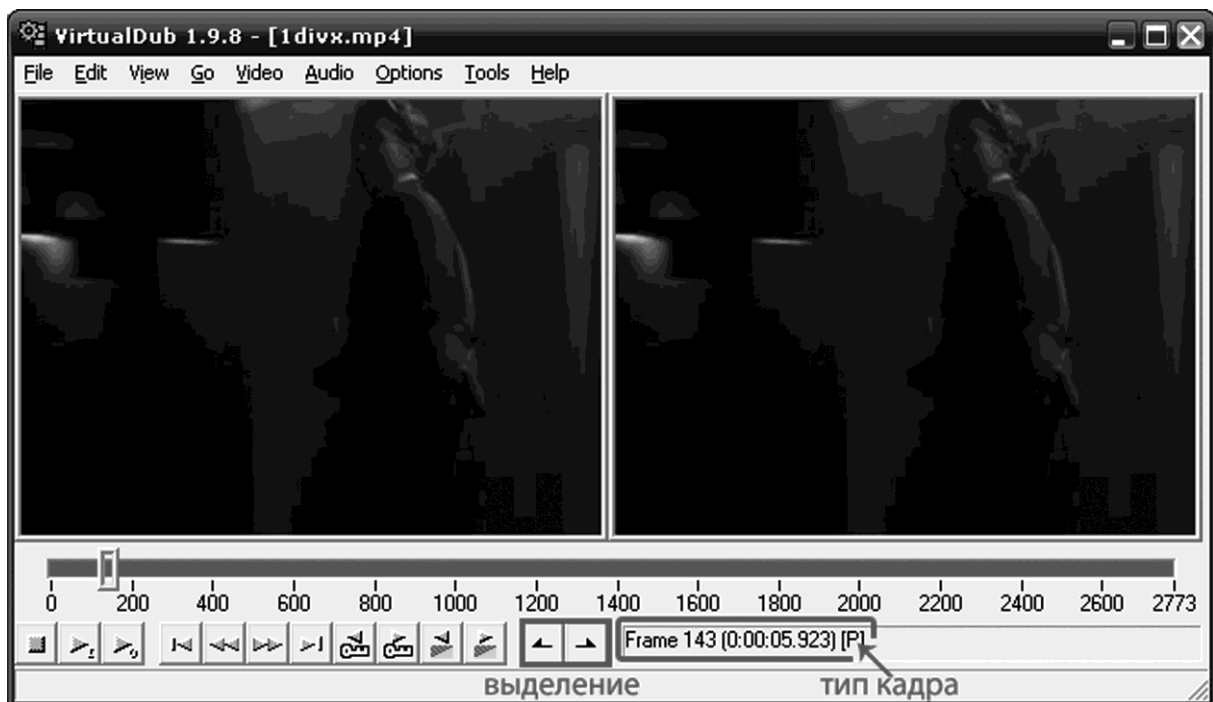


Рисунок 2. Поиск искаженных кадров в VirtualDub

2. Искаженное изображение можно просматривать несколько раз и сравнить его с оригиналом.

3. Визуально оценивается качество видеоизображения в момент ошибки по шкале MOS от 1 до 5.

Шкала оценок (правила):

- Оценка 5 может быть присвоена только идеальному несжатому видеоизображению.
- Оценка 4 присваивается видеоизображению с незначительными артефактами, все объекты различимы на записи и ни что не мешает восприятию.
- Оценка 3 присваивается видео, на котором присутствует значительное искажение картинки, не все объекты различимы, для восприятия нужно прилагать усилия.
- Оценка 2 присваивается видеоизображению с сильными и частыми повреждениями видеоизображения, многие кадры потеряны, объекты могут быть неразличимы, воспринимается с трудом.
- Оценка 1 выставляется видео, на котором ничего не видно и не понятно, это нижняя граница.

В настоящей работе для каждой ошибки свою оценку выставляли 4 эксперта. Затем по их оценкам вычислялось среднеарифметическое значение.

При обработке файлов, закодированных при помощи кодека WMV9, возникли сложности. К сожалению, программа VirtualDub не отображает ключевых и промежуточных кадров для видео, закодированного кодеком Windows Media Video 9, поэтому эксперименты с ним не были нами обработаны.

Результаты экспериментов

Полученные в результате проведения экспериментов данные были обработаны по описанной в предыдущем разделе методике. Все ошибки, как на уровне видео, так и на сетевом уровне были проанализированы и найдено субъективное качество видео Q_{MOS} в зависимости от процента потерь пакетов p и сетевого джиттера j . Полученные значения коэффициентов сведены в Таблицу 1 для сети WiFi и Таблицу 2 для сети 3G.

Таблица 1. Значения коэффициентов модели для кодеков MPEG2, DivX и WMV9 в сети WiFi

| № | Кодек | Q_{ideal} | α^k | β^k | α^w | β^w |
|---|-------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|
| 1 | MPEG2 | 4,2±0,2 | 0,15±0,03 | 0,011±0,002 | 0,04±0,01 | 0,003±0,001 |
| 2 | DivX | 4,7±0,2 | 0,27±0,05 | 0,013±0,003 | 0,13±0,02 | 0,01±0,002 |
| 3 | WMV9 | 4,7±0,2 | – | – | – | – |

Таблица 2. Значения коэффициентов модели для кодеков MPEG2, DivX и WMV9 в сети 3G

| № | Кодек | Q_{ideal} | α^k | β^k | α^w | β^w |
|---|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | MPEG2 | 4,2±0,2 | 0,012±0,002 | 0,025±0,002 | 0,006±0,001 | 0,025±0,001 |
| 2 | DivX | 4,7±0,2 | 0,01±0,003 | 0,07±0,001 | 0,01±0,0005 | 0,03±0,008 |
| 3 | WMV9 | 4,7±0,2 | – | – | – | – |

Было установлено, что качество видеоизображения зависит не только от сетевых искажений, описываемых процентом потерь пакетов и величиной сетевого джиттера, но и от типа кадра, который был искажен. Если ошибка повреждает ключевой кадр, то качество изображения ухудшается сильнее по сравнению с аналогичной ошибкой в промежуточном кадре. Поэтому в Таблицах 1 и 2 нами специально выделено два типа коэффициентов – с потерями на ключевых кадрах и без них.

В Таблице 1 α^k и β^k - коэффициенты модели с потерями пакетов на ключевых кадрах, α^w и β^w - коэффициенты для неповрежденных ключевых кадров, а Q_{ideal} – оценка по шкале MOS для исходного файла (до пересылки по сети).

Изначально у видеоизображения, закодированного кодеком MPEG-4 (DivX), качество выше, чем у видео, закодированного MPEG-2, но при ухудшении характеристик сети качество снижается ощутимее и при больших сетевых помехах становится схожим с качеством MPEG-2. В случае повреждения ключевого кадра качество изображения, закодированного MPEG-4 (DivX), упадет более чем в 2 раза при тех же характеристиках сети, а MPEG-2 в 3,75 раза.

Таким образом, для значительного повышения качества видеоизображения при передаче в беспроводной сети необходимо выполнить два обязательных пункта по модернизации схемы связи:

1. Модернизировать проигрыватель на приемной стороне с тем, чтобы автоматически отбрасывать дублирующиеся RTP пакеты;
2. Сервер потокового видео должен дублировать пакеты, содержащие информацию ключевых кадров;
3. Период между ключевыми кадрами не может превышать 2 секунд (оптимально 1 секунда).

Эти простые меры приведут к тому, что даже плохие по оценке GAP сети [9] будут транслировать видео с оценкой MOS большей 3,5. Стоит отметить, что для кодеков MPEG-4 (DivX) и MPEG-2 передаваемый объем трафика увеличится в среднем на 7%, а качество видео не менее чем в 2 раза. Некоторые исследованные видеоплееры при воспроизведении MPEG-TS MPEG-4 потоков уже автоматически отбрасывают повторяющиеся кадры, что дает принципиальную возможность повышения визуального качества передаваемого видео путем незначительной модификации алгоритма MPEG-TS инкапсуляции на сервере трансляций.

Эксперименты, проведенные на сети WiMAX, показали очень хорошую устойчивость данной сети к ухудшению качества связи. Сети WiMAX по своим характеристикам сопоставимы с фиксированными сетями Ethernet. Очень трудно найти ошибки в сети, т.к. процент потерь для всех проведенных тестов был равен 0%, а вариация задержки порядка 19 мс даже в тестах, проведенных при большом конкурирующем трафике. По данным [9] такой тип трафика по системе GARP относится к хорошему (Good).

Характеристики сети WiFi в условиях реальной эксплуатации составили: сетевой джиттер порядка 40 мс (Acceptable) и потери пакетов до 10% (Poor).

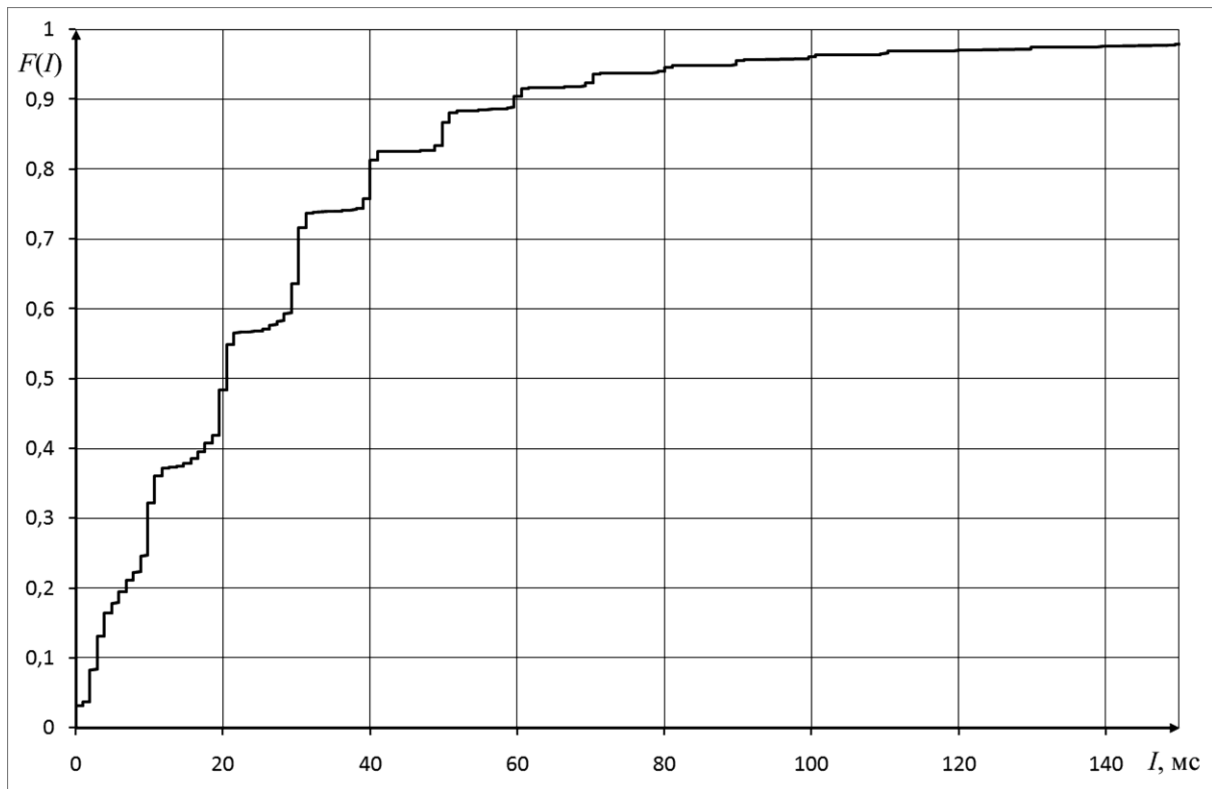
3G сети очень чувствительны к внешним помехам и даже при хорошем уровне сигнала присутствуют значительные потери пакетов (Poor) и вариация задержки порядка 40 мс (Acceptable). Также было установлено, что у одного из 3G провайдеров оборудование зачастую дублировало исходящие пакеты, что само по себе создавало на видео очень сильные артефакты. Устранить данные помехи поможет наше решение с дублированием, а значит и отсеиванием дублированных кадров.

Решение с дублированием ключевых кадров должно значительно повысить качество видео при передаче его в ненадежных из-за расстояния и шумов сетях, таких как WiFi и 3G.

Распределение межпакетного интервала для VLC

Основными характеристиками видео потоков на пакетном уровне принято считать функции распределения для межпакетного интервала I и для размера пакетов W . Так как VLC передает данные кадрами одного размера (1370 байт), то необходимо исследовать только функцию распределения для межпакетных интервалов $F(I)$.

Данная функция находится следующим образом: на приемной стороне анализируется время прихода пакетов и вычисляются межпакетные интервалы, по значениям которых строится функция распределения. Функции распределения $F(I)$ для кодеков MPEG-2 и MPEG-4 имеют сходные характеристики и представлены на Рисунках 5 и 6 соответственно.



**Рисунок 5. Функция распределения межпакетного интервала для
кодека MPEG-4 (DivX)**

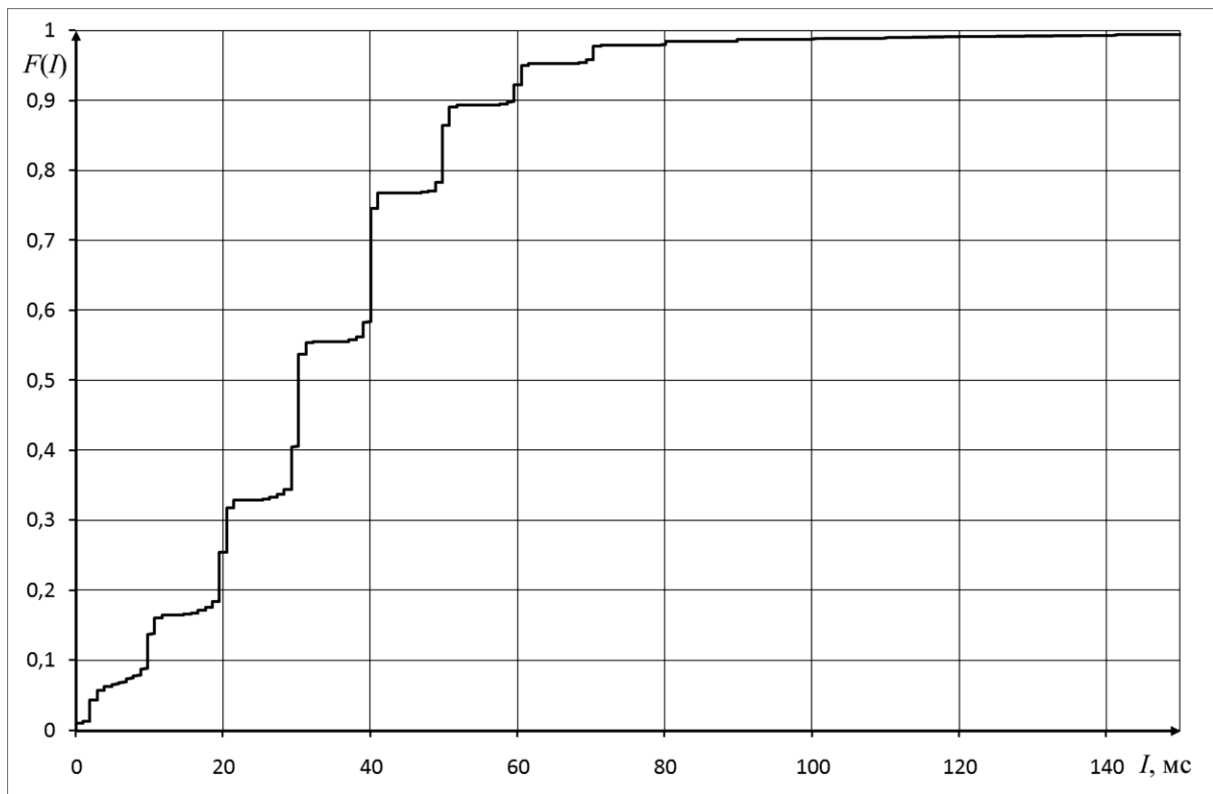


Рисунок 6. Функция распределения межпакетного интервала для кодека MPEG-2

Данные рисунки наглядно показывают линейчатый асимметричный спектр. Подобного рода нестандартные распределения обычно описывают при помощи среднего значения $E[I]$ и межквартильного интервала $Q[I]$ для межпакетного интервала.

Для кодека MPEG4 среднее значение межпакетного интервала $E_{MPEG4}[I]=36$ мс, а межквартильная ширина $Q_{MPEG4}[I]=29$ мс. Для кодека MPEG2 среднее значение межпакетного интервала $E_{MPEG2}[I]=35$ мс, а межквартильная ширина $Q_{MPEG2}[I]=21$ мс.

Выводы

В данной работе было проанализировано качество передачи видео в беспроводных сетях стандартов WiFi, 3G и WiMAX и исследовано влияние искажения ключевых кадров на качество видео. Оказалось, что сеть

WiMAX достаточно надежна и по характеристикам соответствует проводной локальной сети. На сетях WiFi и 3G качество видео изображения значительно снижается при передаче. Для повышения качества видео в этих сетях нами предложен метод дублирования ключевых кадров сервером потокового видео при использовании кодека MPEG-4 (DivX). Это увеличит качество видео на сетях WiFi и 3G минимум в 2 раза при незначительном увеличении размера потока на 7%. Кроме того данный метод может повысить качество видео за счет модернизации видеопроигрывателя функцией отсеивания дублирующихся кадров.

В работе были найдены коэффициенты математической модели, описывающей качество передачи видео для случая беспроводной сети WiFi и кодеков MPEG-2 и MPEG-4 (DivX). Для расчета значений коэффициентов была разработана специальная экспериментальная методика, которая позволила собрать и обработать данные.

В заключение хотелось бы выразить благодарность самарским отделениям операторов связи: Мегафон, Билайн и Метромакс, которые бесплатно предоставили оборудование и технические возможности для проведения экспериментов.

Литература

- [1] Cisco Systems, “Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2008–2013”, 9 июня 2009 (http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-481360.pdf).
- [2] X. Hei, C. Liang, and et. al., A Measurement Study of a Large-Scale P2P IPTV System, IEEE Trans. on Multimedia, vol. 9, 8, 2007.
- [3] Y. Won and M. Choi, End-User IPTV Traffic Measurement of Residential Broadband Access Networks, in IEEE NOMS, 2008.

- [4] S. Bradner, J. McQuaid, RFC2544 - Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices, March 1999.
- [5] International Telecommunication Union, "Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures (ITU-R BT.500-11)" (2002).
- [6] Д. Ватолин, А. Паршин, О. Петров, А. Титаренко, "Субъективное Сравнение Современных Видеокодеков" (http://www.compression.ru/video/codec_comparison/pdf/msu_subjective_codecs_comparison_ru.pdf).
- [7] Haghani, E. De, S. Ansari, N., VoIP Traffic Scheduling in WiMAX Networks, in: IEEE Global Telecommunications Conference, 2008.
- [8] M. Claypool and J. Tanner, "The Effects of Jitter on the Perceptual Quality of Video," in ACM Multimedia, 1999.
- [9] P. Calyam, M. Sridharan and et. al., "Performance Measurement and Analysis of H.323 Traffic," in PAM Workshop, 2004.
- [10] T. Silverston, O. Fourmaux, A. Botta, A. Dainotti, A. Pescapè, G. Ventre, K. Salamatián, Traffic analysis of peer-to-peer IPTV communities, Computer Networks, Vol. 53, pp. 470-484, 2009.
- [11] S. Tao, J. Apostolopoulos, R. Guerin, Real-Time Monitoring of Video Quality in IP Networks, IEEE Trans. on Networking, Vol. 16, No. 5, pp. 1052-1065, 2008.
- [12] A. Sukhov, P. Calyam, W. Daly, A. Ilin, Towards an analytical model for characterizing behavior of high-speed VVoIP applications, Computational Methods in Science and Technology, 11(2), 161-167 (2005).
- [13] VideoLAN team, "VideoLAN, Free streaming and multimedia solutions for all OS!" (<http://www.videolan.org/>).
- [14] Wireshark Foundation, "Wireshark. Go deep.". (<http://www.wireshark.org/>)
- [15] Avery Lee, "Welcome to virtualdub.org! - virtualdub.org" (<http://www.virtualdub.org/>).
- [16] "Main Page - Avisynth". (http://avisynth.org/mediawiki/Main_Page)

[17] “Traces of video stream in wireless networks (WiMAX, 3G, WiFi)”
(<http://www.ip4tv.ru/stati/aaa.html>).