

## Анализ эффективности предсказания перегрузок<sup>1</sup>

Д. В. Банков, Е. М. Хоров, А. И. Ляхов

*Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН, Москва, Россия*

Поступила в редколлегию 01.11.2015

**Аннотация**—При передаче видеопотока реального времени по беспроводной сети могут возникнуть перегрузки: ситуации, когда пропускной способности канала оказывается недостаточно для передачи всего потока с соблюдением ограничений на время передачи каждого пакета. Те пакеты видеопотока, для которых время передачи превысило ограничение, отбрасываются, что приводит к искажению видеоизображения на адресате. Известны методы фильтрации видеопотоков в случае перегрузок, которые удаляют из очереди пакетов наименее значимые, снижая тем самым искажения видеоизображения. Используя известные из литературы методы прогнозирования состояния канала и видеопотоков, можно предсказывать перегрузки и проводить фильтрацию очереди заранее. В работе исследуется максимальный выигрыш в снижении искажений видеоизображения, который можно достичь при заблаговременной фильтрации очереди.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Передача видеопотоков реального времени, MPEG-4, I-Frame Delay, метрики качества видеопотоков, MSE.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Согласно прогнозам Cisco [1], к 2017 году доля мультимедийных данных в пользовательском трафике превысит 60%, причем большая их часть будет представлять собой видеопотоки реального времени, передаваемые по беспроводным сетям. Из-за используемых алгоритмов сжатия видеопотоки имеют переменную интенсивность [2]. Кроме того, свойства беспроводного канала, в частности, его пропускная способность, могут меняться со временем. Оба явления являются причиной того, что в какой-то момент времени (назовем его **моментом перегрузки**) видеопоток может не быть передан с соблюдением ограничений на время передачи каждого пакета. Те пакеты видеопотока, для которых время передачи превышает заданное ограничение, отбрасываются из очереди, что приводит к искажениям видеоизображения, воспроизводимого на адресате.

Особенностью современных сжатых видеопотоков является то, что потеря разных пакетов по-разному влияет на качество видеоизображения. Это свойство используется различными механизмами фильтрации, предотвращающими или, по крайней мере, снижающими искажения видеоизображения (например, I-Frame Delay [3, 4]). Эти механизмы в момент перегрузки определяют наименее важные пакеты в очереди и удаляют их, позволяя таким образом более важным пакетам быть переданными в срок. Однако удаление пакетов только в момент перегрузки ограничивает множество пакетов-кандидатов на удаление.

Существует ряд работ, посвящённых как предсказыванию состояния беспроводного канала [5, 6], так и предсказыванию интенсивности видеопотоков [7, 8]. Используя результаты этих, или похожих работ, можно было бы предсказывать перегрузки и выполнять фильтрацию очереди заранее. В работе исследуется, насколько можно уменьшить искажения за счет предварительной фильтрации пакетов.

<sup>1</sup> Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №14-07-31233 мол\_а.

Дальнейшее изложение статьи построено следующим образом: в главе 2 приведены сведения о структуре видеопотоков MPEG-4 Part 2 и об алгоритме фильтрации I-Frame delay, а также приведена постановка задачи; в главе 3 введена метрика качества видеопотоков и описан алгоритм предварительной фильтрации очереди; в главе 4 представлены результаты экспериментов, в которых разработанный алгоритм сравнивался с I-Frame delay; в главе 5 приводится заключение и сформулированы основные результаты работы.

## 2. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПЕРЕДАЧЕ ВИДЕОПОТОКОВ

### 2.1. Структура видеопотоков MPEG-4 Part 2

Видеоизображение представляет собой последовательность изображений, каждое из которых можно представить как матрицу пикселей. В случае, если используется цветовой формат YCbCr [9], каждый пиксел содержит в себе одну компоненту яркости и две хроматические компоненты.

Видеоизображение сжимают, так как незакодированное видеоизображение требует большого объёма памяти для хранения и широкого канала для передачи. Рассмотрим в упрощённом виде структуру видеопотока, сжатого согласно стандарту MPEG-4 Part 2 [10].

Видеопоток состоит из последовательно идущих **кадров**, которые бывают трёх типов: I, P и B. I-кадр кодируется с использованием только той информации, которая содержится в соответствующем изображении. P-кадр описывает изменения изображения относительно предыдущего I- или P-кадра. B-кадры описывают изменения изображения относительно предыдущего и последующего I- или P-кадра. Последовательность закодированных кадров, которая начинается с I-кадра и заканчивается следующим I-кадром (но не включает его), называется GOP (англ. Group of Pictures — группа изображений). Структура GOP видеопотока, при которой B-кадры одной GOP могут содержать в себе изменения относительно I- или P-кадров другой GOP, называется открытой. В случае, когда кадры могут ссылаться только на кадры из своей GOP, структура GOP называется закрытой.

На рис. 1 и 2 стрелками изображены зависимости кадров друг от друга в случае открытой и закрытой структуры GOP, соответственно. Используемый способ сжатия видеопотоков приводит к тому, что ошибки, совершённые при передаче одного кадра, могут привести к неправильному декодированию кадров, ссылающихся на этот кадр. Из-за потери части I- или P-кадра все кадры, от этого кадра и до конца GOP, будут декодированы с ошибкой. В то же время, потеря части B-кадра не приведёт к ошибкам при декодировании других кадров. Таким образом, B-кадры оказываются наименее важными для передачи.

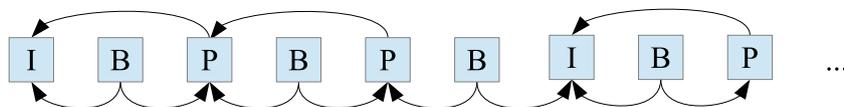


Рис. 1. Зависимости кадров в случае открытой структуры GOP

### 2.2. I-Frame delay

Механизм I-Frame delay [3] (IFD) учитывает тот факт, что потеря разного типа кадров по-разному влияет на качество видеопотока. При использовании механизма I-Frame delay очередь фильтруется, если при поступлении нового кадра детектируется перегрузка. Для этого

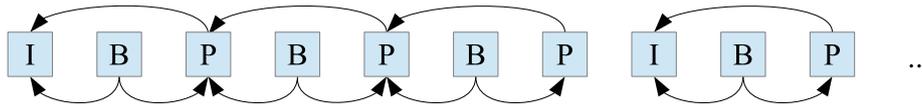


Рис. 2. Зависимости кадров в случае закрытой структуры GOP

новый кадр помещается в очередь, а затем из очереди удаляются кадры в порядке убывания приоритета: сначала В-, потом Р-, и, наконец, I-кадры, пока перегрузка не будет устранена. Перегрузка считается устранённой, когда количество пакетов в очереди не превышает некоторого значения, зависящего от текущей скорости передачи и от ограничения на время передачи пакетов. При наличии нескольких кадров одного типа сначала удаляются самые старые. При проведении фильтрации может быть удален и только что поступивший кадр, если у него низкий приоритет, например, если это В-кадр, а других В-кадров нет. При фильтрации кадр, который передаётся в текущий момент, не удаляется (см. рис. 3).

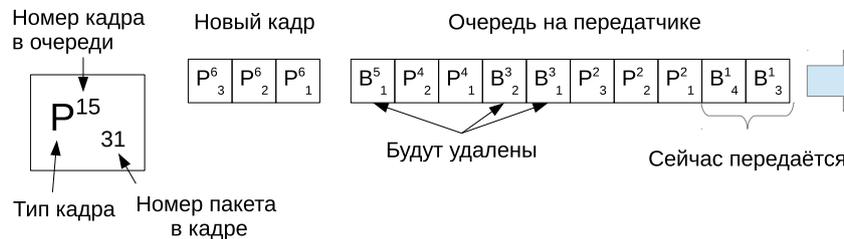


Рис. 3. Фильтрация очереди при помощи I-Frame Delay

### 2.3. Постановка задачи

Используя механизмы, рассматриваемые в работах [5–8], можно было бы предсказывать моменты перегрузки заранее. Тогда можно было бы заранее провести фильтрацию, удалив из очереди наименее важные пакеты и передав большее число пакетов, важных с точки зрения качества видеоизображения. Конечно, данные механизмы не обеспечивают идеального знания состояния канала и видеопотока, однако исследование предела качества видеопотока, получаемого при правильном предсказании перегрузок, тоже представляет научный интерес.

Цель данной работы – ответить на вопрос, насколько эффективно в различных сценариях можно снижать искажения видеоизображения, предсказывая моменты перегрузки заранее.

## 3. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для ответа на поставленный в разделе 2.3 вопрос необходимо:

1. определить метрику качества видеоизображения, переданного по беспроводному каналу,
2. разработать алгоритм удаления кадров из очереди, минимизирующий искажения видеоизображения с учётом заранее известной информации о состоянии канала, интенсивности и структуре видеопотока и особенностей введённой метрики,
3. определить сценарии проведения экспериментов и сравнить работу разработанного алгоритма с IFD в этих сценариях.

## 3.1. Метрика

Для того, чтобы измерять искажения видеоизображения, вызванные повреждением видеопотока при передаче, принятый видеопоток сравнивается с исходным видеопотоком при помощи некоторой метрики. Традиционно для измерения качества видеопотоков используется метрика  $MSE$  [11] (англ. Mean squared error — среднеквадратичная ошибка). Для изображений  $X$  и  $Y$  размером  $M \times N$  пикселей значение метрики  $MSE$  задается формулой:

$$MSE(X, Y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [X(m, n) - Y(m, n)]^2, \quad (1)$$

где  $X(i, j)$  — это значение компоненты яркости пиксела  $(i, j)$  изображения  $X$ .

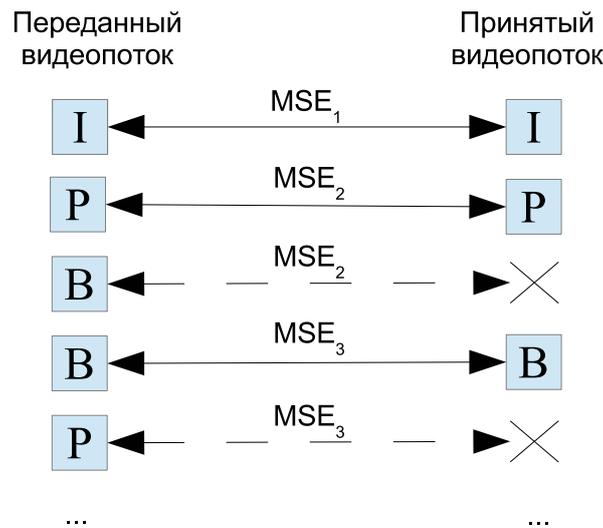


Рис. 4. Подсчёт метрики

По значениям метрики  $MSE$  для отдельных изображений можно построить метрику  $MSE$  для видеопотоков. Пусть при передаче был потерян некоторый кадр, и изображение, соответствующее этому кадру, не было сформировано. До тех пор, пока не придёт очередной кадр, получатель будет наблюдать предыдущее изображение с теми искажениями, которые имелись у последнего полученного изображения. В то же время, если ранее пришедшее изображение не содержало искажений, зритель не заметит пропажи одного или даже нескольких кадров. Поэтому значение  $MSE$  для двух видеопотоков считается следующим образом: сначала построим соответствие между кадрами этих видеопотоков (см. рис. 4). Для тех изображений из исходного видеопотока, которые имеют пару среди изображений принятого видеопотока, посчитаем значение  $MSE$ . Для остальных изображений примем значение  $MSE$  равным значению  $MSE$  для предыдущей пары.  $MSE$  для двух видеопотоков будем считать как суммарное значение  $MSE$ , делённое на число кадров в исходном видеопотоке.

Потеря нескольких кадров подряд не увеличивает значение  $MSE$ , но приводит к замираниям видеоизображения. Для учета таких замираний будем рассматривать величину  $n$  — максимальное для данного видеопотока число потерянных подряд кадров. Значение величины  $n$  позволяет найти максимальную длительность замираний как  $n \times \Delta t$ , где  $\Delta t$  — период смены кадров. Зная максимальную длительность замираний, можно сделать выводы о том, насколько замирания будут заметны зрителю.

Таким образом, при оценке эффективности алгоритмов фильтрации очереди будет использоваться двухкомпонентная метрика ( $MSE, n$ ). В данной работе при проведении экспериментов значения метрики вычислялись при помощи алгоритма, описанного в работе [12].

### 3.2. Передача видеопотока

Введём обозначения и сформулируем допущения относительно системы передачи видеопотока. Будем рассматривать состояние очереди на станции-отправителе в моменты поступления в очередь новых видеок кадров. Пусть кадры поступают в очередь строго периодически (например, каждые 40 мс, что соответствует частоте 25 кадров в секунду), и каждый кадр может состоять из различного количества пакетов одинакового размера. Примем период поступления видеок кадров в очередь за единицу времени. После добавления пакетов в конец очереди из начала очереди изымается некоторое число пакетов, определяемое текущей скоростью передачи  $C(t)$ .

Пусть  $d$  – ограничение на время передачи пакета. Пакеты, которые находятся в очереди дольше, чем  $d$  единиц времени, отбрасываются без передачи.

### 3.3. Эвристический алгоритм

Для оценивания качества видеопотоков в разделе 3.1 была предложена двухкомпонентная метрика ( $MSE, n$ ). Для того, чтобы сравнить эффективность различных механизмов фильтрации очереди, необходимо сравнить значения метрики качества видеопотоков, переданных с использованием данных механизмов. Для этого нужно зафиксировать значение одной из компонент и сравнивать значения второй. Фиксация значения  $MSE$  невозможна, так как в большинстве случаев невозможно добиться совпадения значений  $MSE$  при разных множествах удалённых пакетов. Поэтому будет фиксироваться значение  $n$ . Пусть при передаче видеопотока с использованием некоторого механизма фильтрации очереди, например, I-Frame delay, значение  $n$  было равно  $n^*$ .

Опишем алгоритм, который отбрасывает кадры, чтобы достичь значения  $MSE_{min}(n^*)$  – минимального значения  $MSE$ , которое можно получить при заблаговременной фильтрации потока при условии, что значение  $n$  не превышает заданное значение  $n^*$ .

Сложность задачи фильтрации видеопотока состоит в том, что в большинстве случаев невозможно без эксперимента определить, удаление каких пакетов позволит минимизировать значение метрики  $MSE$ . В то же время, число пакетов в видеопотоке велико, и полный перебор удаляемых пакетов не представляется возможным. Будем снижать вычислительную сложность алгоритма следующими способами:

1. Разделим время передачи видеопотока на интервалы так, что перегрузки на одних интервалах времени не влияют на качество изображений, полученных при декодировании кадров, пришедших в другие интервалы времени. Это можно сделать, потому что искажения, вызванные повреждением кадров одной GOP, не распространяются на изображения, полученные из кадров других GOP. Таким образом можно минимизировать метрику на каждом интервале по отдельности.
2. Применим эвристический метод, состоящий в том, что при удалении В- и I-кадров выбираются кадры наибольшего размера. Порядок удаления кадров опирается на анализ искажений видеоизображения, проведённый в работе [13]. Удаление начинается с В-кадров, потому что их удаление не приводит к росту  $MSE$ . Удаление Р-кадров приводит к возникновению искажений, продолжающихся до конца GOP, поэтому, в первую очередь, удаляются Р-кадры, ближайšie к концу своей GOP. Удаление I-кадров вызывает наиболее значительные искажения видеоизображения, поэтому I-кадры удаляются в последнюю очередь. Когда

удаление кадров целиком невозможно из-за ограничения на  $n$ , проводится удаление отдельных пакетов. При этом пакеты с заголовками кадров не удаляются, так как их удаление приводит к потере кадров.

Рассмотрим алгоритм удаления кадров подробнее. Удаление кадров будем производить в цикле. Введём множество удаляемых из видеопотока пакетов  $P$ , которое изначально пусто.

В начале каждой итерации цикла происходит передача видеопотока, из которого удалены пакеты, принадлежащие множеству  $P$ . При передаче запоминается зависимость времени пребывания в очереди пакетов видеопотока от времени их поступления в очередь. При этом в случае, когда пакеты, пришедшие в одинаковое время, оказались переданными в разное время, отмечается максимальное время пребывания. После передачи видеопотока вычисляется и запоминается значение  $MSE$ . Если перегрузок нет или значение  $MSE$  равно 0, то алгоритм завершается. Если перегрузка есть и наблюдается для пакетов, пришедших в интервале  $[t_a^*, t_b^*]$  (см. рис. 5), то вычисляются значения  $t_a$  и  $t_b$ , которые определяют соответственно левую и правую границы интервала, на котором будут удаляться пакеты видеопотока.  $t_a$  определяется как ближайший предшествующий  $t_a^*$  момент времени, такой, что время передачи кадра, пришедшего в этот момент, меньше заданного ограничения  $d_0$ . Можно сказать, что  $t_a$  — это время, когда канал был достаточно хорошим для передачи видеопотока без искажений. В данной работе значение  $d_0$  было равно 1.  $t_b$  определяется как ближайший следующий за  $t_b^*$  момент прихода I-кадра. Интервал  $[t_a, t_b]$  состоит из трёх промежутков.

1.  $[t_a, t_a^*)$  — для пакетов, пришедших в данном интервале, не наблюдается перегрузка, но удаление этих пакетов позволяет освободить очередь и таким образом либо отсрочить момент начала перегрузки, либо избежать её.
2.  $[t_a^*, t_b^*)$  — это интервал, на котором наблюдается перегрузка. Во-первых, удаление пакетов из данного интервала позволяет передать вовремя пакеты более важных кадров. Во-вторых, удаление повреждённых кадров целиком позволяет уменьшить значение  $MSE$  видеопотока, так как значение  $MSE$  для данных кадров не будет учитываться в сумме по кадрам видеопотока.
3.  $[t_b^*, t_b)$  — на данном интервале уже не наблюдается перегрузка, но искажения видеоизображения остаются. Искажения видеоизображения устраняются с приходом следующего I-кадра.

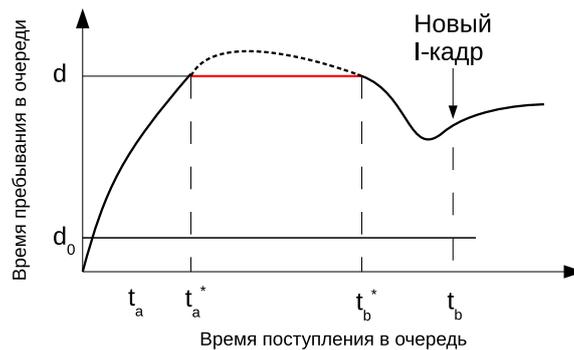


Рис. 5. Зависимость времени передачи пакетов от времени их поступления в очередь

Если интервалов, на которых происходит перегрузка, несколько, то каждый интервал рассматривается отдельно. После вычисления  $t_a$  и  $t_b$  к множеству  $P$  добавляется один кадр или один пакет, который выбирается в интервале  $[t_a, t_b)$  следующим образом.

- Проводится поиск В-кадров, удаление которых не приведёт к увеличению  $n$  выше  $n^*$ . Если такие кадры найдены, то удаляется тот, который имеет максимальный размер.
- Если такие В-кадры не найдены, то ищется Р-кадр, лежащий в самом конце GOP, удаление которого не приведёт к увеличению  $n$  выше  $n^*$ . Если такой кадр найден, то он удаляется.
- Если Р-кадр не найден, то ищется I-кадр, удаление которого не приводит к увеличению  $n$  выше  $n^*$ . Если такой кадр найден, то он удаляется.
- Если I-кадра с заданными свойствами нет, то ищутся В-кадры, состоящие более чем из одного пакета. Если такие кадры найдены, то выбирается В-кадр наибольшего размера. Из его конца удаляется пакет. В следующих итерациях цикла пакеты будут удаляться из данного кадра, пока не останется только пакет с заголовком кадра.
- Если нет В-кадров, состоящих более чем из одного пакета, ищутся Р-кадры, состоящие более чем из одного пакета. Если такие кадры найдены, то выбирается ближайший к концу своей GOP. Из его конца удаляется пакет. В следующих итерациях цикла пакеты будут удаляться из данного кадра, пока не останется только пакет с заголовком кадра.
- Если нет Р-кадров, состоящих более чем из одного пакета, ищутся I-кадры, состоящие более чем из одного пакета. Если такие кадры найдены, то выбирается кадр наибольшего размера. Из его конца удаляется пакет. В следующих итерациях цикла пакеты будут удаляться из данного кадра, пока не останется только пакет с заголовком кадра. Если I-кадров, состоящих более чем из одного пакета больше нет, то алгоритм возвращает сообщение о том, что при заданном  $n^*$  устранить перегрузку нельзя.

После добавления кадра или пакета к множеству  $P$  происходит переход к следующей итерации на данном интервале или переход к следующему интервалу, на котором наблюдается перегрузка, или завершение алгоритма.

#### 4. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравним разработанный алгоритм предварительной фильтрации очереди с I-Frame Delay. Разработанный алгоритм будем называть идеальным, так как при его работе предполагается точное знание состояния канала и видеопотока. Для сравнения алгоритмов фильтрации была проведена серия экспериментов, в которых видеопотоки передавались с использованием I-Frame Delay и идеального алгоритма, а затем сравнивалось качество переданных видеопотоков. Видеопотоки были разделены на три типа в зависимости от их содержания согласно классификации, приведённой в [14]. Видеоизображение типа «новости» представляет из себя небольшой подвижный участок — лицо диктора — на неподвижном фоне. Видеоизображения типа «футбол» содержат множество мелких подвижных объектов на однотонном фоне. Видеоизображениям типа «фильм» присущи частые смены плана, большое количество движения.

Всего было использовано по 140 видеофрагментов каждого типа. Видеофрагменты имели одинаковую интенсивность. Их параметры приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры видеофрагментов

Параметр	Значение
Длина GOP	30
Число В-кадров между двумя последовательными Р-кадрами	1
Тип GOP	Открытый
Ограничение на время передачи, $d$	5

Во всех экспериментах скорость передачи  $C$  была задана и не менялась со временем. Такие ситуации соответствуют, например, использованию методов детерминированного доступа, исследованных в [15]. При постоянной скорости передачи число пакетов, которое можно передать за время  $d$ , равно  $C \cdot d$ , поэтому будем считать, что механизм I-Frame Delay удаляет из очереди пакеты до тех пор, пока количество пакетов превышает значение  $C \times d$ , где  $d$  — ограничение на время передачи пакета.

Для каждого видеофрагмента была получена зависимость  $MSE_{IFD}(C)$  — значение  $MSE$ , получаемое при заданной скорости передачи  $C$  при использовании механизма I-Frame Delay. Для каждого видеофрагмента и значения  $C$  определялось максимальное количество потерянных подряд кадров  $n_{IFD}$ . При  $n^* = n_{IFD}$  определялось  $MSE_{Ideal}(C)$  — значение  $MSE$  для идеального механизма фильтрации.

Для того, чтобы определить выигрыш в качестве видеоизображения, получаемый при фильтрации с предсказанием перегрузок, по отношению к фильтрации без предсказания перегрузок, вычислялось значение величины  $\mu = \frac{MSE_{Ideal}}{MSE_{IFD}}$ . В случаях, когда  $MSE_{IFD}$  был равен 0, считалось, что  $\mu = 1$  (при этом  $MSE_{Ideal}$  тоже было равно 0). На рис. 6–8 изображена зависимость величины  $\langle \mu \rangle$  от скорости передачи, где  $\langle \cdot \rangle$  обозначает усреднение по всем видеофрагментам одного типа.

Возможно, эффективность алгоритмов фильтрации зависит от того, с какими параметрами закодирован передаваемый видеопоток. Для проверки данной гипотезы был проведён ряд экспериментов, в которых видеопотоки были закодированы с параметрами, отличными от приведённых в Табл 1. В одних экспериментах максимальная длина GOP была уменьшена до 10. В других экспериментах число В-кадров между двумя последовательными Р-кадрами было равно 2 и 3. Был проведён ряд экспериментов, в которых видеопотоки кодировались с закрытой структурой GOP — в данных видеопотоках отсутствовали ссылки В-кадров одной GOP на I-кадр следующей GOP. Также были проведены эксперименты, в которых видеопотоки кодировались с разделением на пакеты — при таком способе кодирования при потере одного пакета из кадра остаётся возможность безошибочно декодировать остальные пакеты этого кадра. Численные результаты данных экспериментов оказались близки к значениям, изображённым на рис. 6–8.

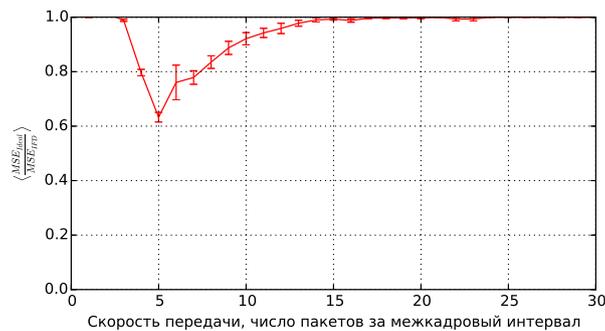


Рис. 6. Значения  $\langle \mu \rangle$  для видеофрагментов типа «фильм»

Рассмотрим подробно зависимость для видеофрагмента «фильм», показанную на рис. 6. Её можно условно поделить на четыре участка.

Первый участок соответствует скоростям передачи от 15 пакетов за межкадровый интервал и более. Здесь механизм I-Frame Delay так же эффективен, как и идеальный механизм филь-

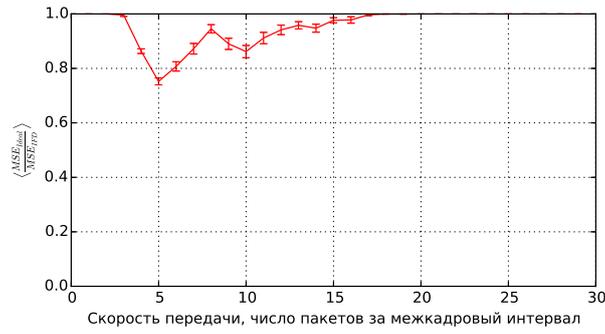


Рис. 7. Значения  $\langle \mu \rangle$  для видеофрагментов типа «новости»



Рис. 8. Значения  $\langle \mu \rangle$  для видеофрагментов типа «футбол»

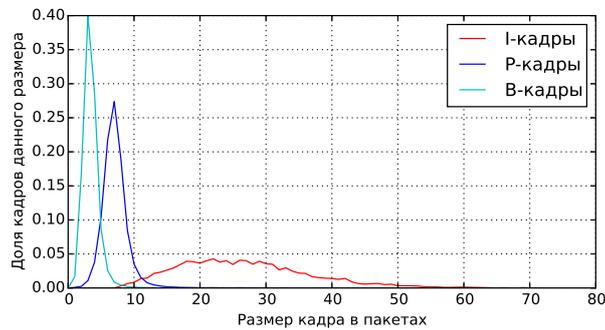


Рис. 9. Распределение размеров кадров для видеофрагментов типа «фильм»

трации. При таких скоростях перегрузки либо не происходят, либо устраняются удалением одиночных В-кадров.

Второй участок соответствует скоростям передачи от 10 до 15 пакетов за межкадровый интервал. На этом промежутке периодически возникает необходимость удаления Р-кадров, что приводит к ненулевому значению  $MSE$ , однако при этом есть возможность сохранить целостность I-кадров. Предварительная фильтрация позволяет снизить значение  $MSE$  максимум на 10% за счёт дополнительного удаления В-кадров.

Третий участок соответствует скоростям передачи от 4 до 10 пакетов за межкадровый интервал. При таких скоростях неизбежно повреждение I- и Р- кадров. Фильтрация очереди позволяет значительно уменьшить повреждения, а выигрыш от предварительной фильтрации



**Рис. 10.** Значения  $\langle \mu \rangle$  для видеофрагментов типа «фильм» при ограничении на время передачи пакета равном 3



**Рис. 11.** Значения  $\langle \mu \rangle$  для видеофрагментов типа «фильм» при ограничении на время передачи пакета равном 10

объясняется тем, что заранее удаляются наименее важные Р-кадры. Также, важную роль играет тот факт, что I-Frame Delay не удаляет тот кадр, который передаётся в текущий момент и поэтому не всегда есть возможность освободить очередь для I-кадра, если в данный момент передаётся В- или Р-кадр. Использование предварительной фильтрации решает данную проблему.

Четвёртый участок соответствует скоростям ниже 4 пакетов за межкадровый интервал. При таких скоростях повреждаются практически все I-кадры и механизмы фильтрации очереди становятся неэффективными.

Были проведены эксперименты, в которых исследовалось влияние ограничения на время передачи на эффективность алгоритмов фильтрации. На рис. 10 и 11 изображена зависимость  $\langle \mu(C) \rangle$  для видеопотоков типа «фильм» при ограничении на время передачи  $d$  равном 3 и 10 соответственно. Как видно, при всех значениях  $d$  графики имеют «провал», левая граница которого приходится на скорость 4 пакета за межкадровый интервал, а правая граница увеличивается с ростом  $d$ . Сдвиг правой границы объясняется тем, что за время  $d$  при постоянной скорости передачи  $C$  можно передать  $C \cdot d$  пакетов, следовательно, при двукратном уменьшении  $d$  требуется в два раза увеличить скорость для того, чтобы передать такое же число пакетов. Для того, чтобы объяснить положение левой границы, рассмотрим распределение размеров кадров в видеофрагментах, изображённое на рис. 9. Пусть в начале очереди находится новопришедший I-кадр. Так как размеры I-кадров велики, то за время  $d$  будут в основном переданы пакеты только этого кадра. После завершения передачи I-кадра в очереди будут находиться пакеты, время пребывания которых в очереди близко к  $d$ . Средний размер Р-кадра равен 7 пакетам. Получается, что при скоростях меньших 4, большинство Р-кадров

невозможно передать даже за два межкадровых интервала (что соответствует случаю, когда В-кадр, приходящий перед Р-кадром, удаляется из очереди), и поэтому даже фильтрация очереди не позволит передать Р-кадры без повреждения.

Вернёмся к зависимостям  $\langle \mu(C) \rangle$ , изображённым на рис. 6–8, и к распределению размеров кадров, изображённого на рис. 9. Из зависимости  $\langle \mu(C) \rangle$  и распределения размеров кадров для видеопотоков типа «фильм» можно сделать вывод, что для видеопотоков данного типа интересная на практике область скоростей — это скорости больше 10 пакетов за межкадровый интервал. Действительно, из распределения следует, что I-кадры размера более, чем 50 пакетов практически не встречаются, а это значит, что при ограничении на время передачи в 5 межкадровых интервалов передать видеопоток без повреждения I-кадров можно только при скоростях, больших 10 пакетов за межкадровый интервал. В то же время, при меньших скоростях в видеопотоке могут повредиться I-кадры, что приведёт к невозможности сменить план и к длительным (длиной, как минимум, в один GOP) искажениям видеоизображения. Аналогичным образом можно показать, что для видеопотоков типа «новости» и «футбол» интересная на практике область скоростей — это скорости выше 12 и 8 пакетов за межкадровый интервал соответственно. В то же время в интересной на практике области скоростей для всех типов видеопотоков значение  $\langle \mu(C) \rangle$  принимает значения не ниже 0.9. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод, что в интересной на практике области скоростей предварительная фильтрация не может значительно улучшить качество видеопотоков по сравнению с I-Frame Delay.

## 5. ВЫВОДЫ

В данной работе рассмотрен процесс передачи видеопотоков реального времени по беспроводной сети в условиях, когда имеющихся канальных ресурсов недостаточно для того, чтобы передать все пакеты видеопотока с соблюдением ограничения на время передачи каждого пакета. Рассмотрен способ устранения искажений видеоизображения, вызванных потерей пакетов при передаче, путём фильтрации очереди на станции-отправителе. Проведено исследование того, насколько предсказание интенсивности видеопотока может повысить эффективность алгоритмов фильтрации очереди.

Предел качества видеоизображения, который можно достичь при фильтрации очереди, можно найти с помощью описанного в разделе 3.3 алгоритма минимизации искажений видеоизображения. Данный алгоритм лежит в основе разработанной методики анализа эффективности механизмов фильтрации очереди. Для того, чтобы определить эффективность какого-либо механизма фильтрации очереди в заданном сценарии, нужно сравнить качество видеопотоков, получаемых с использованием исследуемого механизма фильтрации очереди, с пределом качества, определяемым при помощи разработанного алгоритма.

В работе был рассмотрен ряд сценариев, в которых исследовалась эффективность известного механизма I-Frame Delay. Согласно результатам экспериментов, при интересных на практике соотношениях скорости передачи и интенсивности видеопотока, то есть таких соотношениях, при которых возможна передача видеопотока без повреждения I-кадров, значения  $MSE$ , полученные с использованием механизма I-Frame Delay, практически не отличаются от минимально возможных. Данные результаты позволяют сделать вывод, что в рассмотренных сценариях предсказание интенсивности видеопотоков не даёт значимого эффекта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2012-2017. url:[http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white\\_paper\\_c11-481360\\_ns827\\_Networking\\_Solutions\\_White\\_Paper.html](http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-481360_ns827_Networking_Solutions_White_Paper.html)

2. A.G. Kiryanov, V.A. Loginov, A.I. Lyakhov, E.M. Khorov. Analytical model of P-persistent queue management method for multimedia streaming over wireless networks// Journal of Communications Technology and Electronics, 2015, Vol. 60, No. 12.
3. *Kozlov S., Van der Stok P., Lukkien J.* Adaptive scheduling of MPEG video frames during real-time wireless video streaming //World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, 2005. WoWMoM 2005. Sixth IEEE International Symposium on a. - IEEE, 2005. - P. 460-462.
4. *Khorov E.M., Gushchin A.S., Safonov A.A.*. Distortion Avoidance While Streaming Public Safety Video in Smart Cities //Lecture Notes in Computer Science, 2015, v. 9305, pp. 89-100.
5. *Schafhuber D., Matz G.* MMSE and adaptive prediction of time-varying channels for OFDM systems //Wireless Communications, IEEE Transactions on. - 2005. - V. 4. - №. 2. - P. 593-602.
6. *Eyiceoz T., Duel-Hallen A., Hallen H.* Deterministic channel modeling and long range prediction of fast fading mobile radio channels //Communications Letters, IEEE. - 1998. - T. 2. - №. 9. - C. 254-256.
7. *Kumwilaisak W., Kim J. W., Kuo C. C. J.* Reliable wireless video transmission via fading channel estimation and adaptation //Wireless Communications and Networking Conference, 2000. WCNC. 2000 IEEE. - IEEE, 2000. - T. 1. - C. 185-190.
8. *Liu H., Mao G.* Prediction algorithms for real-time variable-bit-rate video //Communications, 2005 Asia-Pacific Conference on. - IEEE, 2005. - Pp. 664-668.
9. *Recommendation ITU-R BT.601-7, Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios*
10. *ISO/IEC 14496-2 Coding of audio-visual objects Part 2: Visual*
11. *Chikkerur S. et al.* Objective video quality assessment methods: A classification, review, and performance comparison //Broadcasting, IEEE Transactions on. - 2011. - V. 57. - №. 2. - P. 165-182.
12. *Dmitry Bankov, Evgeny Khorov, Andrey Lyakhov.* Fast Quality Assessment of Videos Transmitted over Lossy Networks. // In Proc. of IEEE En&T 2014, Moscow, Russia, 2014.
13. *Greengrass J., Evans J., Begen A. C.* Not all packets are equal, part 2: The impact of network packet loss on video quality //Internet Computing, IEEE. - 2009. - V. 13. - №. 2. - P. 74-82.
14. *Ries M. et al.* Content based video quality estimation for H. 264/AVC video streaming //Wireless Communications and Networking Conference, 2007. WCNC 2007.- IEEE, 2007. - Pp. 2668-2673.
15. *Ivanov A. S., Lyakhov A. I., Khorov E. M.* Analytical model of batch flow multihop transmission in wireless networks with channel reservations //Automation and Remote Control. - 2015. - V. 76. - №. 7. - P. 1179-1192.

## Efficiency Analysis of Overflow Prediction

**D.V. Bankov, E.M. Khorov, A.I. Lyakhov**

*Institute for Information Transmission Problems,  
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

During video streaming over wireless networks a situation can occur, when the channel throughput is insufficient to transmit all video packets in time. Such a situation is called overflow. Packets are dropped if they spend more time in transmitter's queue than the specified restriction, which leads to distortion of received video. To deal with the overflows one can apply the queue filtration algorithms that detect overflows and drop the least important packets from the queue to reduce video distortion. Using popular channel and video stream prediction methods one could predict the overflows and filter the queue in advance. In this paper, we investigate the maximal gain in video quality achievable through beforehand queue filtering.

**KEYWORDS:** Real-time video streaming, MPEG-4, I-Frame Delay, video quality metrics, MSE..