

УДК 621.327:681.5

**Д.Э. Двухглавов,**  
кандидат технических наук, доцент,  
**А.Г. Оксюк, В.В. Твердохлеб**

## АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ СКОРОСТЬЮ ПЕРЕДАЧИ ВИДЕОПОТОКА

*В данной статье анализируются методы управления скоростью потока сжатых видеокадров в условиях изменяющихся параметров каналов телекоммуникационных сетей.*

**Ключевые слова:** прогрессивный алгоритм, среднеквадратическое отклонение, битовая скорость, управление сжатием видеоданных, технология JPEG.

*У статті аналізуються методи управління швидкістю потоку стиснених відеокадрів в умовах змінюваних параметрів каналів телекомунікаційних мереж.*

**Ключові слова:** прогресивний алгоритм, середньоквадратичне відхилення, бітова швидкість, управління стисненням відеоданих, технологія JPEG.

*This paper examines the methods of controlling the flow rate of compressed video frames in the terms of changing of the channel parameters of telecommunication networks.*

**Keywords:** progressive algorithm, degree of the standard deviation, bit rate, controlling of the video data compression, JPEG technology.

### Постановка задачи и анализ литературы

Современные тенденции использования телекоммуникационных сетей определяют, что большую долю передаваемой информации составляют видеопотоки. Это определяется увеличением количества пользователей видеосервисов. В условиях возрастания объемов передаваемых видеоданных важным является обеспечение соответствующего качества предоставляемого видеосервиса согласно требованиям системы QoS (Quality of Service) [1].

Задача обеспечения качества передачи информации решается в двух направлениях: уменьшение объема видеопотока и повышение эффективности управления нагрузкой на сеть (маршрутизация, резервирование каналов). Применяемые методы распределения нагрузки сети не обеспечивают доставки сжатого видеопотока в соответствии с требованиями качества, так как их использование не снижает интенсивности нагрузки. В конечном итоге это приводит к увеличению потерь и росту задержек передачи в видеоданных. Это, в свою очередь, обуславливает задержки и потери кадров в системах интерактивного видео (видеотелефонная связь, например, Skype) в сетях Wi-Fi, а также в сервисах потокового видео, что проявляется в неравномерном характере воспроизведения видео на конечном узле или запаздывании видеопотока.

Для снижения интенсивности видеопотока используются методы сжатия потока видеокадров. Однако их использование не обеспечивает своевременного учета динамики изменений характеристик видеопотока, а именно: статистических  $\tau$ , психовизуальных  $\rho$  и семантических  $\beta$  особенностей и содержания потока видеокадров. Кроме того, известные методы сжатия не обеспечивают учета динамики изменений пропускной способности сети.

В связи с этим, *актуальной задачей* является задача управления параметрами компрессии видеопотока  $P_{\text{comp}} = f(I, V_w)$ , обеспечивающего согласованность динамически меняющейся интенсивности  $I$  передаваемого сжатого видеопотока с динамически изменяющейся пропускной способностью  $V_w$  каналов телекоммуникационных сетей.

Интенсивность  $I$  видеопотока выражается битовой скоростью  $r(t)$  – объемом сжатых видеоданных, которые требуется передать в единицу времени.

Далее будет рассматриваться управление битовой скоростью потока на примере одного кадра, т.е.:

$$r(t) = \sum_{i=1} r_i, \quad (1)$$

где  $r_i$  – количество бит для представления одного блока кадра.

Степень достоверности принятых видеоданных характеризует среднеквадратическое отклонение (СКО), которое обозначают  $d(t)$ . Данный параметр вычисляется по формуле (2):

$$d = \frac{1}{K \cdot H \cdot W} \sum_{n \in N} \sum_{x, y \in N} (S_n(x, y) - S_n^*(x, y))^2, \quad (2)$$

где  $K$  – количество кадров в видеопотоке;

$H$  и  $W$  – высота и ширина одного кадра соответственно;

$S_n(x, y)$  и  $S_n^*(x, y)$  – значения яркости исходного и восстановленного пикселей.

Чем меньше степень компрессии, тем большее количество бит используется для представления величины  $S^*$  из формулы (2), тем выше достоверность принятого кадра относительно исходного, т.е. меньше уровень СКО. С другой стороны, снижение СКО путем увеличения битовой скорости ограничено пропускной способностью канала.

Алгоритмы управления интенсивностью видеопотока в процессе обработки базируются на механизмах изменения степени сжатия в зависимости от динамически меняющейся пропускной способности сети, используя для этого параметры методов компрессии. Для построения методов управления видеопотоком предложено ряд направлений [2–4]. В частности, в работе [3] предлагается управление битовой скоростью потока на основе метода динамического программирования. В работах [3; 4] рассматривается решение задачи, в которой за основу взят метод множителей Лагранжа. Еще одной особенностью рассмотренных алгоритмов является то, что результаты ориентированы на технологию JPEG2000.

### Цель статьи

Рассмотреть особенности построения алгоритмов управления параметрами компрессии и сформулировать направления дальнейшего их совершенствования. При этом при проведении исследований учитываются особенности сжатия информации с использованием технологии JPEG [5], которая наиболее удовлетворяет требованиям, сформулированным в техническом задании на разработку соответствующего программного обеспечения.

### Основная часть

В наиболее обобщенном случае задача управления кодированием видеопотока заключается в нахождении параметров компрессии, обеспечивающих передачу

відеопотока с мінімальною битовою швидкістю при рівні СКО, не перевищуючим мінімальний  $d_{\min}$ :

$$\begin{cases} r(t) \rightarrow \min \\ d(t) \leq d_{\min} \end{cases} \quad (3)$$

Управління кодуванням відеопотока може розглядатися як надстройка відносно кодека (см. рис. 1).



Рис. 1. Взаємодія системи управління і механізму кодування

Таким образом, возможности управления потоком определяются алгоритмом кодирования.

Алгоритм осуществляется следующим образом. Исходный кадр делится на блоки  $8 \times 8$  пикселей, после чего к каждому блоку применяется ДКП, затем – квантование.

Управление реализуется на данном этапе. Трансформанта кодируется в несколько проходов. На каждом проходе кодируется часть бит коэффициентов трансформанты. Часть закодированных коэффициентов восстанавливается на приемной стороне, таким образом, получим полноразмерный кадр с низким качеством. Каждый следующий проход последовательно улучшает визуальное качество восстанавливаемого кадра до тех пор, пока кадр не будет восстановлен в соответствии с заданными качественными критериями.

Существует два подхода к реализации прогрессивного алгоритма: метод спектральной выборки (*spectral selection method*) и метод последовательного приближения (*successive approximation method*) [5].

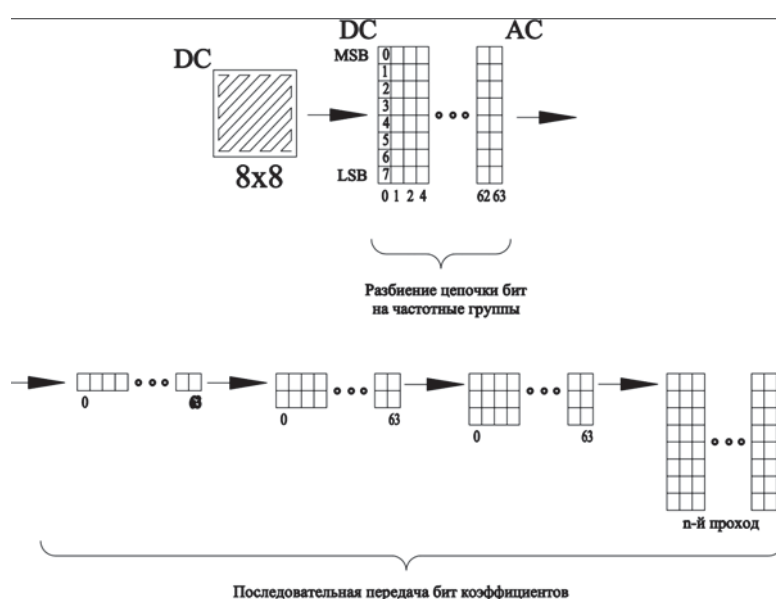


Рис. 2. Метод последовательного приближения

В первом случае коэффициенты трансформанты после зигзаг-сканирования разделяются на несколько частотных полос. Частотная полоса задается в заголовке прохода путем указания начальных и конечных индексов в зигзаг-последовательности. Полоса, содержащая коэффициент ДС, кодируется на первом проходе.

Метод последовательного приближения предполагает на первом этапе арифметический сдвиг значений коэффициентов трансформант вправо на определенное количество бит, либо деление на 2.

Используется метод последовательного приближения, пока не будет достигнута полная (требуемая) точность коэффициентов (рис. 2). В обоих случаях коэффициенты трансформант после квантования коэффициенты трансформанты разделяются на битовые плоскости, состоящие из бит одного разряда. Наиболее значимые биты коэффициентов (несколько битовых плоскостей) кодируются первыми. Каждый последующий проход увеличивает точность коэффициентов на 1 бит.

Для метода последовательного приближения максимальная битовая скорость определяется следующим образом:

$$r_{\max} = \sum_{i=1}^N 64n, \quad (4)$$

где  $N$  – количество блоков в кадре;

$n$  – количество битовых плоскостей, входящих в первый проход.

Данный способ может реализовываться для каналов с низкой пропускной способностью, позволяющей осуществлять передачу лишь нескольких, наиболее значимых бит.

Рассмотрим видеокадр, состоящий из 3-х блоков  $8 \times 8$  разной степени насыщенности, т.е. имеющих разные характеристики и содержание. Предположим, что для каждого из блоков  $b_1, b_2, b_3$  в начальный момент времени  $r(t)_1 = r(t)_2 = r(t)_3$ , согласно формуле (4). При передаче в канал с пропускной способностью  $B_w < r(t)$  необходимо снизить битовую скорость до значения  $B_w \geq r(t)$ , чтобы обеспечить передачу. При использовании метода последовательного приближения достигается это передачей  $n$  битовых плоскостей из всего их множества. В этом случае для каждого из блоков будет обеспечена битовая скорость, позволяющая осуществлять передачу в канал ( $B_w \geq r(t)$ ). В то же время, поскольку характеристики и содержание блоков различны (наиболее значащие разряды могут быть различными, наличие нулевых плоскостей, соответствующих различным разрядам и т.д.), то для СКО в этом случае, с учетом выражения (2), имеем  $d(t)_1 = d(t)_2 = d(t)_3$ . Иными словами, передача кадра с одинаковыми параметрами компрессии для всех блоков не обеспечивает учет динамики изменений характеристик блоков внутри кадра, а именно: статистических  $\tau$ , психовизуальных  $\rho$  и семантических  $\beta$  особенностей и содержания блоков. Это приводит к тому, что часть блоков видеокадра может сжиматься с неоправданно высоким качеством (довольно низким уровнем ошибки), хотя особенности и содержание данных блоков допускают кодирование с довольно низкими показателями качества. Обратный случай – блоки видеокадра кодируются

с большими потерями, поскольку их характеристики и содержание также не были учтены.

Для предотвращения подобной ситуации целесообразно при вычислении битовой скорости использовать параметр, характеризующий насыщенность блока, тем самым учитывая различия характеристик и содержания блоков. С учетом этого, формула (1) примет вид:

$$r(t) = f(n, d(t), P_{bl}), \quad (5)$$

где  $P_{bl} = f(\phi, c, v)$  – параметр насыщенности блока, зависящий от его статистических  $\tau$ , психо-визуальных  $\rho$  и семантических  $\beta$  особенностей и содержания;

$n$  – количество передаваемых в канал битовых плоскостей.

В этом случае битовая скорость при передаче в канал от блока к блоку будет различной, но можно обеспечить минимизацию уровня СКО по каждому блоку, принимая во внимание величину  $P_{bl}$ :

$$\begin{cases} d(t) \rightarrow \min \\ P_{bl} = \text{var} \end{cases}, \quad (6)$$

В то же время чем сильнее квантуются коэффициенты трансформанты, тем меньше становится разность СКО для блоков, поскольку биты младших разрядов в связи с квантованием отбрасываются.

Принимая битовую скорость  $r(t)$  целевой функцией, рассмотрим решение задачи (1) методом множителей Лагранжа.

При использовании выбора решения поиск сводится к минимизации функции Лагранжа:

$$\sum (r_i^{n_i} - \lambda d_i^{n_i}) \rightarrow \min \quad (7)$$

Значение множителя Лагранжа  $\lambda$  корректируется до тех пор, пока не будет определена битовая скорость, заданная точкой  $n_i$  на R-D кривой, которая минимизирует выражение (7). Далее нужно найти точку  $n_i$ , обеспечивающую минимизацию СКО при условии минимизации битовой скорости.

Алгоритм управления параметрами компрессии на базе метода множителей Лагранжа рассматривается на примере метода последовательного приближения. В случае метода спектральной выборки процесс выполняется аналогично, за исключением того, что количество состояний может составлять 64.

Алгоритм включает следующие этапы:

1. Установить начальную точку  $n_i$ , равную 0 (нет информации, включенной в блок).

2. Для  $k = 1, 2, 3, \dots$  вычислить:  $\Delta r_i^k = r_i^k - r_i^{n_i}$  и  $\Delta d_i^k = d_i^{n_i} - d_i^k$ .

3. Если  $\Delta d_i^k / r_i^k > \lambda^{-1}$  – установить  $n_i = k$ .

Видеокадр имеет R-D характеристику, представленную в табл. 1. Проиллюстрируем процесс решения с использованием данной таблицы.

Пусть пропускная способность канала  $V_w \leq 300$  кб. Диапазон битовых скоростей от 300 кб и выше исключается из множества возможных решений.

Таблица 1

Вычисление множителя Лагранжа.

$D_i$	64	128	192	256	320	384	448	512
$D_d$	22	14	10	7	5	3	1	0
$\lambda$	0,34	0,109	0,05	0,02	0,01	0,007	0,002	–

Из оставшихся решений выбираем решение, которое минимизирует выражение (8) – это точка, соответствующая скорости 150 кб.

Поиск решения, удовлетворяющего условия (3), производим следующим образом [3]:

1. Находим массив значений  $\lambda$ , ограниченный точкой, минимизирующей выражение (8).

2. Точку, соответствующую передаче битовых плоскостей, в соответствии с условиями (3), находим на середине отрезка оставшегося множества  $\lambda$ . В данном случае это точка  $r(t)=100$  кб, что соответствует передаче в канал 2-х битовых плоскостей.

Таким образом, в соответствии с результатами приведенного анализа, можно утверждать следующее.

1. Управление параметрами сжатия определяется особенностями построения алгоритмов кодека. Большинство известных работ ориентированы на кодеки семейства JPEG и его модификаций (JPEG2000, PJPEG). Исследование возможности применения известных алгоритмов в алгоритмах, использующих другие алгоритмы сжатия, не рассматривалась.

2. Использование принципа динамического программирования определяет необходимость обсуждения особенностей построения алгоритма его реализации. В круг вопросов, требующих решения, относится выбор шага дискретизации этапов (блок, сегмент, кадр, фрагмент потока), оценка оперативности работы алгоритма, организация хранения промежуточных данных.

3. Использование метода множителей Лагранжа отличается тем, что исходит из предположения, что между скоростью кодирования и степенью искажения имеется функциональная зависимость, постоянная для всех кадров. На практике ситуация является иной – зависимость не всегда может быть представлена функционально. Кроме того, метод множителей Лагранжа используется для решения задач, связанных с обработкой в рамках заданного сегмента изображения, и не рассматривается в качестве математической основы алгоритмов, учитывающих взаимосвязь между кадрами в видеопотоке.

4. При построении алгоритмов управления не учитывается возможное понижение пропускной способности каналов связи.

5. Алгоритмы управления должны в обязательном порядке удовлетворять временные ограничения.

**Выводы**

Известные методы сжатия потока видеокадров способствуют снижению интенсивности видеопотока. Однако они не обеспечивают своевременный учет динамики изменений характеристик видеопотока. Это приводит к случаям, когда поток видеокадров сжимается с неоправданно высоким качеством (довольно низким уровнем ошибки), хотя особенности и содержание данного потока допускают кодирование с довольно низкими показателями качества, или поток сжатых видеокадров кодируется с большими потерями, поскольку его характеристики и содержание также не были учтены.

Известные алгоритмы управления сжатием изображения с учетом динамики изменения параметров функционирования телекоммуникационной системы, являются неэффективными и требуют дополнительных исследований в направлении унификации и учета параметров работы кодирующих устройств.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. JPEG 2000 image coding system : Core coding system, ITU-T recommendation T.800 and ISO/IEC 15444-1. ITU-T and ISO/IEC JTC 1, 2000.
2. *Беляев Е.А.* Управление скоростью и ошибкой кодирования в системе сжатия и передачи видеoinформации с ограничениями на память передающего и принимающего устройств / Е.А. Беляев, А.М. Тюрликов // Компьютерная оптика. – 2007. – Т. 31. – № 2. – С. 69–76.
3. *Taubman D., Marcellin M.* JPEG2000 Image Compression Fundamentals, Standards and Practice, Kluwer Academic Publisher, 2002.
4. JPEG2000 Standard for Image Compression. Concepts, Algorithms and VLSI Architectures, A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2005.
5. *Shi, Yun Q.* Image and video compression for multimedia engineering: fundamentals, algorithms, and standards / Yun Q Shi, Huifang Sun.
6. *Беллман Р.* Динамическое программирование / Р. Беллман. – М. : Издательство иностранной литературы, 1960.

Отримано 02.06.2014