

МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ БАЗА ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМОВ КОНТРОЛЯ БИТОВОЙ СКОРОСТИ ВИДЕОПОТОКА С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ТРЕБУЕМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА

Баранник В.В., Твердохлеб В.В., Хаханова А.В., Харченко Н.А.

Введение

На сегодняшний день современные инфокоммуникации характеризуются стремительным ростом объема передаваемых видеоданных. Так же происходит постоянный рост числа пользователей систем видеоконференций и сервисов трансляции потокового видео. Одновременно с этим, увеличение пропускной способности каналов запаздывает, что является причиной частых перегрузок сетей.

В таких условиях возможность адаптируемости интенсивности видеопотока к пропускной способности канала является актуальной.

Данная возможность способна обеспечить эффективную передачу видеопотока, предотвратить возникновение потерь и задержек передачи видеоданных.

Целью данного исследования является построение методики управления битовой скоростью видеопотока с целью согласования ее величины с пропускной способностью канала инфокоммуникационной сети.

Основными задачами построения метода управления контроля битовой скоростью являются: определение условий эффективной передачи видеопотока на фоне изменяющейся пропускной способности канала, построение механизма управления битовой скоростью видеопотока и контроля уровня ошибки, а также способов обеспечения быстрого действия механизма управления.

1. Условия эффективной передачи видеопотока

Эффективной можно считать такую передачу видеопотока, при которой обеспечивается выполнение следующих условий:

- соответствие требованиям QoS касательно величин задержки и потерь данных;
- поддержание уровня ошибки, не превышающего заданного значения;
- обеспечение визуально приемлимого качества видео на приеме.

Таким образом, наряду с управлением битовой скоростью R , необходимо также обеспечить значение ошибки, в качестве которой будем

рассматривать уровень среднеквадратического отклонения, на требуемом уровне [1].

Принимая во внимание тот факт, что величина пропускной способности изменяется во времени произвольным образом, метод управления должен быть способен обеспечивать минимальный уровень битовой скорости при минимальных значениях ошибки.

Тогда условия эффективной передачи видеопотока при изменяющейся пропускной способности канала могут быть представлены следующим образом:

$$\begin{cases} R \rightarrow \min; \\ d \leq d_{\min}. \end{cases} \quad (1)$$

При полученных условиях эффективной передачи видеопотока, рассмотрим способ организации данных, дающий возможность построения управляющего метода.

2. Суть метода контроля битовой скорости

Исходный видеокадр F , после выполнения ДКП и преобразования цветовой модели RGB в модель YCbCr, рассматривается как множество p трансформант, определяемое следующим образом:

$$P = \sum_{p=1}^Q Y_p, \quad (2)$$

где Y_p – p -я трансформанта кадра.

В свою очередь, каждая трансформанта Y_p представлена совокупностью $(h;w)$ – x компонент $Y_p = \|y(p)_{hw}\|$.

Каждая компонента $y(p)_{hw}$ трансформанты Y_p представляется в двоичном виде, на основе последовательности $\alpha(p)_{hw}^{(\mu)}$ бит (рис.1). Это эквивалентно преобразованию:

$$\|y(p)_{hw}\| \rightarrow \left\| \left\langle \alpha(p)_{hw}^{(\mu)}, \alpha(p)_{hw}^{(\mu-1)} \dots \alpha(p)_{hw}^{(m)} \dots \alpha(p)_{hw}^{(0)} \right\rangle^T \right\|, \quad (3)$$

$$\alpha(p)_{hw}^{(\mu)} \in \{0,1\}, \quad h = \overline{0,7}; \quad w = \overline{0,7}; \quad \mu = \overline{7,0},$$

где $\alpha(p)_{hw}^{(\mu)}$ – μ -й бит двоичного разложения $(h; w)$ –й компоненты p -й трансформанты.

Множество всех бит μ -го разряда p -й трансформанты составляет битовую плоскость $Y(p)_{\mu}$.

В свою очередь, совокупность двоичных представлений всех элементов матрицы Y_p составляет битовый куб $Y_p^{(3d)}$, пример которого представлен на рисунке 1.

При рассматриваемом способе организации данных, верхний слой данного куба образуют старшие биты $\alpha(p)_{hw}^{(\mu)}$ двоичного представления.

Представление трансформанты Y_p в трехмерном пространстве позволяет осуществлять передачу данных отдельными битовыми плоскостями, аналогично подходу, который используется методом последовательного приближения технологии Progressive JPEG [2].

В этом случае появляется возможность контролировать объем передаваемой информации в зависимости от требований пропускной способности B_w канала.

В зависимости от требуемого объема бит для представления кадра, используются либо все n битовых плоскостей $Y(p)_\mu$ трансформанты Y_p , либо только $(n - \mu)$ битовых плоскостей, чтобы обеспечить битовую скорость R_F кадра на уровне, не превышающем некоторое требуемое значение.

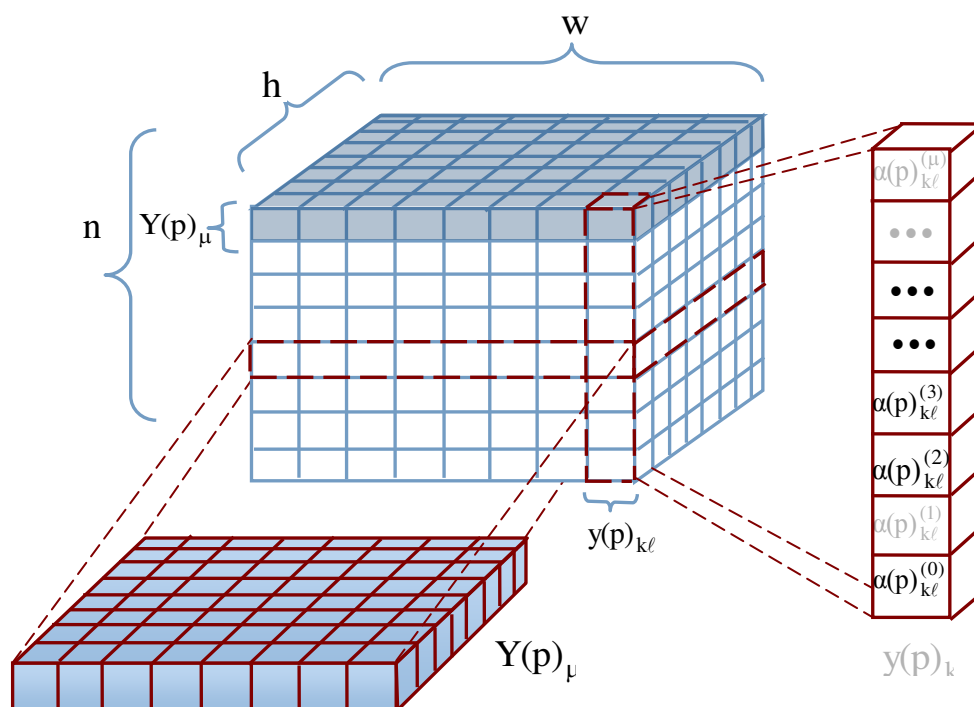


Рис. 1. Представление трансформанты Y_p в виде битового куба $Y_p^{(3d)}$

Таким образом, данный способ представления данных обеспечивает возможность управления компрессией и может быть использован в качестве базового.

Принцип работы метода управления на базе технологии Progressive JPEG может быть описан следующим образом:

1. Данные о величине пропускной способности канала поступают кодеру.

2. Исходя из количества кадров, которые необходимо передать в единицу времени, а также их суммарной битовой скорости, кодер оценивает возможность передачи кадров без дополнительной обработки.

3. Вычисляется разница между фактической и требуемой битовыми скоростями серии кадров.

4. Определяется требуемая битовая скорость для каждого кадра.

5. Вычисляется требуемая битовая скорость трансформант кадра. Если битовая скорость трансформанты превышает требуемую, часть битовых плоскостей исключаются из рассмотрения.

6. Формируется последовательность, состоящая из необходимого для передачи количества кадров, каждый из которых является совокупностью трансформант с битовыми скоростями, не превышающими требуемые значения.

В начальный момент времени t_0 буферное устройство отправляет в канал тестовые пакет R_{start} с известной величины.

Используя значение времени двусторонней задержки RTT , определяется величина полосы пропускания B_w в момент t_0 :

$$B_w = \frac{R_{start}}{RTT}. \quad (4)$$

Также, используя значение RTT , вычисляется фактическое число кадров, которое необходимо поместить в буфер:

$$\varpi(t_0) = \varpi RTT. \quad (5)$$

При полученном значении $\varpi(t_0)$, для соответствующего количества кадров происходит оценка битовых скоростей $R_{p\mu}$ и величины ошибки $d_{p\mu}$ по всем битовым плоскостям каждой из трансформант кадра.

На этапе, предшествующем нахождению $R_{p\mu}$ и $d_{p\mu}$ битовых плоскостей трансформант, выполняется оценка насыщенности НЧ-областей трансформант [3], как показано следующей формулой:

$$\chi_{m,n} = \log_2 \left(\prod_{\gamma=1}^L \prod_{\lambda=1}^{\Lambda} y(p)_{\gamma\lambda} \right), \quad (6)$$

где γ – количество диагоналей НЧ-области трансформанты, λ – число элементов диагонали, $y(p)_{\gamma\lambda}$ – γ, λ -я компонента НЧ-области трансформанты.

Для кадра, состоящего из $m \times n$ трансформант, величины $\chi_{m,n}$ вычисляются по всем строкам.

Если в последовательности $\chi_{m,1}, \chi_{m,n}$ выявлены значения насыщенностей, для которых разность $|\Delta\chi| = \chi_{m,k} - \chi_{m,k+1}$ имеет несущественную величину и справедливо соотношение

$\chi_{m,1} \approx \chi_{m,k} \dots \approx \chi_{m,k+1}$, данные трансформанты составляют вектор стабилизации $S_{j,\delta}$. Индекс j при этом определяет позицию трансформанты в кадре, а δ - количество входящих в него трансформант.

В пределах вектора стабилизации $S_{j,\delta}$, используя подобие между трансформантами, существует возможность сократить количество выполняемых арифметических операций при обработке трансформант.

В частности, часть значений битовых скоростей $R_{p\mu}$ и $d_{p\mu}$ битовых плоскостей одного разряда для трансформант вектора $S_{j,\delta}$ может быть интерполировано.

Интерполированные значения битовых скоростей $R_{p,\mu}^{\text{инт}}$ определяются формулой:

$$R_{p,\mu}^{\text{инт}} = \varphi(R_{p-1,\mu}, R_{p+1,\mu}, R_{p+m,\mu}), \quad (7)$$

где $R_{p-1,\mu}$, $R_{p+1,\mu}$ и $R_{p+m,\mu}$ - значения битовых скоростей, соответствующие $Y^{(p-1,\mu)}$, $Y^{(p,\mu)}$ и $Y^{(p+m,\mu)}$ битовым плоскостям,

Интерполяция значений $d_{p,\mu}^{\text{инт}}$ при этом аналогична (7) и определяется выражением:

$$d_{p,\mu}^{\text{инт}} = \varphi(d_{p-1,\mu}, d_{p+1,\mu}, d_{p+m,\mu}), \quad (8)$$

где $d_{p-1,\mu}$, $d_{p+1,\mu}$ и $d_{p+m,\mu}$ - значения битовых скоростей для $Y^{(p-1,\mu)}$, $Y^{(p,\mu)}$ и $Y^{(p+m,\mu)}$ битовых плоскостей.

Итоговая битовая скорость и СКО для серии из $\varpi(t_0)$ кадров определяется следующими выражениями:

$$R_{\text{seq}} = \sum_{i=1}^{\varpi} \sum_{p=1}^Q R_{p,i}, \quad d_{\text{seq}} = \sum_{i=1}^{\varpi} \sum_{p=1}^Q d_{p,i}, \quad (9,10)$$

где $R_{p,i} = \sum_{\mu=1}^n R_{p\mu}$ - битовая скорость p -й трансформанты i -го кадра,

$d_{p,i} = \sum_{\mu=1}^n d_{p\mu}$ - уровень СКО p -й трансформанты i -го кадра

При полученных значениях R_{seq} и d_{seq} для последовательности $\varpi(t_0)$ кадров определяется разность $\Delta R = B_w - R_{\text{seq}}$ между суммарной фактической битовой скоростью кадров серии и требуемой битовой скоростью, величина которой равна $R_{\text{seq}}^{\text{треб}} = B_w$ [4].

Если $\Delta R \leq 0$, то вся последовательность $\varpi(t_0)$ передается в буфер передатчика без дополнительной обработки.

В случае, когда $\Delta R < 0$, битовую скорость R_{seq} необходимо снизить на величину $|\Delta R|$ для обеспечения требуемой битовой скорости $R_{seq}^{треб}$ последовательности кадров $\varpi(t_0)$.

Используя значение величины требуемой битовой скорости $R^{треб}$, соотношение (1) можем представить в следующем виде:

$$\begin{cases} R \leq R^{треб}; \\ d \leq d_{min}. \end{cases} \quad (11)$$

Очевидно, что величина ΔR определяется следующим выражением:

$$\Delta R = \sum_{i=1}^{\varpi(t_0)} \Delta R_i, \quad (12)$$

где ΔR_i – величина, на которую необходимо снизить битовую скорость каждого кадра последовательности $\varpi(t_0)$.

В то же время, распределение битовых скоростей в серии $\varpi(t_0)$ кадров имеет неравномерный характер. Как правило, серия $\varpi(t_0)$ состоит из кадров различных типов – I, B и P, при этом максимум битовых скоростей соответствует I и P кадрам.

Для такого случая, снижение величины $|\Delta R|$ достигается путем уменьшения битовых скоростей B – кадров последовательности. Обусловлено это тем, что потеря части информации в кадрах данного типа внесет минимальную ошибку в суммарное значение СКО последовательности из $\varpi(t_0)$ кадров при восстановлении.

Величина ΔR_i , на которую необходимо снизить битовую скорость каждого из входящих в последовательность B – кадров, в этом случае определяется следующей формулой:

$$\Delta R_i = \frac{\Delta R}{\varpi(t_0)}, \quad i = \overline{1, j} \quad (13)$$

где j – количество B – кадров в рассматриваемой последовательности

В то же время, последовательность кадров в начале видеопотока, а также сцены с высокой динамикой, могут содержать только I – кадры, обладающие высокой интенсивностью, либо совокупность I и P кадров.

В этом случае вычисление величины ΔR_i производится пропорционально величинам битовых скоростей каждого кадра последовательности $\varpi(t_0)$, как показано выражением:

$$\Delta R_i = \frac{\Delta R}{\varpi} \cdot \frac{R_i}{R_{cp}} = \frac{\Delta R R_i}{R_{seq}}, \quad (14)$$

где $\varpi(t_0)$ – число кадров в серии, R_i – битовая скорость i –го кадра,

$$R_{cp} = \frac{R_{seq}}{\varpi(t_0)} - \text{средняя битовая скорость кадра в серии.}$$

В свою очередь, требуемая битовая скорость кадра последовательности $\varpi(t_0)$ определяется формулой:

$$R_i^{тр\epsilon\delta} = R_i - \Delta R_i. \quad (15)$$

После того, как величина $R_i^{тр\epsilon\delta}$ для i -го кадра найдена, определяется значение требуемых битовой скорости для трансформант кадра, в сумме дающих величину битовой скорости кадра, равную

$$R_i = \sum_{p=1}^Q R_p^{тр\epsilon\delta} \leq R_i^{тр\epsilon\delta}.$$

При определении требуемой битовой скорости трансформанты кадра используются следующие подходы.

В случае, когда в пределах кадра величины $\chi_{m,n}$ для всех трансформант отличаются незначительно, применяется подход, использующий усреднение битовой скорости по кадру:

$$R_p^{тр} = \frac{R_i^{тр\epsilon\delta}}{Q}, \quad (16)$$

где Q – число трансформант в кадре.

Для более точного учета битовой скорости трансформант в пределах кадра, используется подход, учитывающий характер распределения битовой скорости в кадре:

$$R_p^{тр\epsilon\delta} = \frac{R_i^{тр\epsilon\delta}}{Q} \gamma_p, \quad (17)$$

где γ_p – коэффициент, зависящий от степени насыщенности p -й трансформанты.

После того, как для каждой трансформанты кадра найдены величины $R_p^{тр\epsilon\delta}$, определяются битовые плоскости, которые будут исключены, чтобы обеспечить значения битовых скоростей в соответствии с формулами (16, 17).

Для битовых плоскостей трансформант, битовые скорости которых необходимо снизить до величины $R_p^{тр\epsilon\delta}$, определяется порядок ранжирования, при котором первыми обрабатываются битовые плоскости $Y^{(p,\mu)}$, вносящие максимальные значения $d_{p\mu}$ в общее СКО трансформанты.

В первую очередь, это относится к старшим битовым плоскостям $Y^{(p,\mu)}$. Далее обрабатываются битовые плоскости в порядке снижения величин $d_{p\mu}$, вносимых ими в общее СКО.

После определения ранжирования битовых плоскостей, на каждом p –м шаге происходит вычисление суммарных значений СКО и битовой скорости трансформант $Y_p^{(\mu)}$ и $Y_{p+1}^{(\mu)}$, путем сложения значений $R_{p,\mu}$ и $R_{p+1,\mu}$ а также $d_{p,\mu}$ и $d_{p+1,\mu}$.

Сложение значений СКО и битовых скоростей трансформант $Y_p^{(\mu)}$ и $Y_{p+1}^{(\mu)}$ происходит попарно, с учетом порядка обработки. Суммируются при этом только величины, имеющие одинаковые индексы ранжирования.

На каждом p –м шаге вычисления требуемой битовой скорости трансформанты определяется условно-оптимальное $R_{F,p}^*$ значение битовой скорости кадра, состоящего из p трансформант, исходя из условий:

$$\begin{cases} R_{i,p}^* \in \{R_{i,p}^*\} | R_{i,p} \leq R_p^{\text{треб}}; \\ d_{i,p} \rightarrow \min. \end{cases} \quad (18)$$

Величина $R_{F,p+1}$ для кадра F на $p+1$ –м шаге в этом случае будет определяться следующим способом:

$$R_{F,p+1} = \sum_{i=p}^{p+1} \sum_{u=1}^n R_{i,u}, \quad (19)$$

где u –индекс очередности обработки битовой плоскости, $R_{i,u}$ – битовая скорость u –й битовой плоскости трансформанты в порядке снижения вносимого уровня СКО,

В свою очередь, СКО на $p+1$ –м шаге будет определяться выражением:

$$d_{F,p+1} = \sum_{i=p}^{p+1} \sum_{u=1}^n R_{i,u}, \quad (20)$$

где $d_{i,u}$ – битовая скорость u –й битовой плоскости трансформанты.

В результате сложения битовых скоростей и СКО по трансформантам $Y_p^{(\mu)}$ и $Y_{p+1}^{(\mu)}$ на $p+1$ шаге, результирующий порядок обхода полученного множества будет определяться суммарными значениями СКО по уменьшению, как показано на рис. 2.

При таком способе перераспределения данных, крайними в кодограмме трансформанты располагаются битовые плоскости, вносящих минимальные величины СКО для трансформанты.

Это позволяет более эффективно производить коррекцию битовой скорости трансформант, исключая необходимый объем битовых плоскостей для снижения битовой скорости трансформанты, не прибегая к дополнительным операциям.

Действия, описанные выражениями (16-20), выполняются на каждом из Q шагов для всех $\varpi(t_0)$ кадров серии. Результирующая битовая скорость R_{seq} последовательности кадров, подлежащих передаче при этом будет эквивалентна следующему выражению:

$$R_{seq}^{треб} = \sum_{i=1}^v \sum_{p=1}^Q R_{i,p}^{треб}, \quad (21)$$

где $R_{p,i}^{треб}$ - полученное в соответствии с (16, 17) значение битовой скорости p -й трансформанты i -го кадра последовательности.

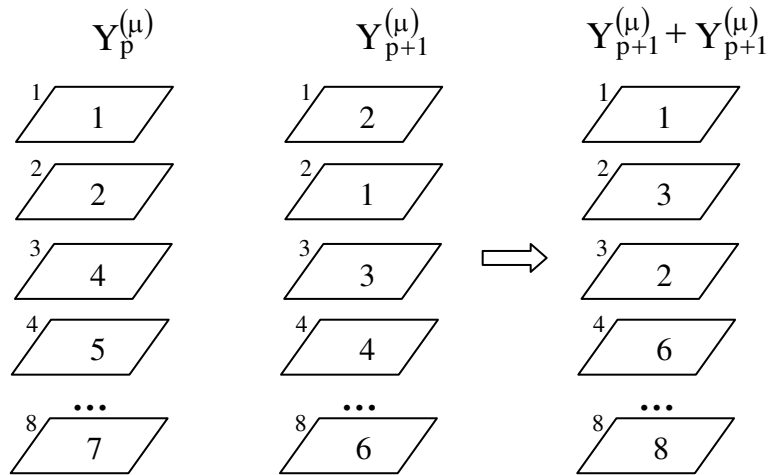


Рис. 2. Порядок обхода отдельных трансформант $Y_p^{(\mu)}$ и $Y_{p+1}^{(\mu)}$ а также их суммарного множества, полученного в результате, в зависимости от величин СКО битовых плоскостей

Выбор на каждом p -м шаге вычисления требуемой битовой скорости трансформанты в соответствии с условиями (18) гарантирует, что уровень СКО, соответствующий полученной последовательности из $\varpi(t_0)$ кадров, будет минимально возможным в момент времени t_0 .

Далее, сформированная последовательность $\varpi(t_0)$ кадров, помещается в выходной буфер, размер которого рассчитывается согласно следующей формуле:

$$R_{буф} = \varpi R_{TT} R_{cp}. \quad (22)$$

После помещения $\varpi(t_0)$ кадров в буфер происходит отправка всей серии кадров в канал, а также определение величины R_{TT} , по величине которой, определяется величина полосы пропускания B_w в момент t_1 , в соответствии с (4), а также количество кадров $\varpi(t_1)$, из которого будет состоять передача в момент t_1 .

Повышению быстродействия рассматриваемого метода управления битовой скоростью способствует учет особенностей распределения уровня

СКО в пределах каждой трансформанты. Величина ошибки в пределах трансформанты распределяется таким образом, что старшим битовым плоскостям соответствуют высокие уровни $d_{p,\mu}$ [5]. В то же время, распределение битовой скорости между битовыми плоскостями в трансформанте имеет случайный характер. Данные особенности представлены следующим соотношением:

$$\begin{cases} d_{p,1} < d_{p,2} < d_{p,3} < \dots d_{p,n} \\ R_{p,\mu} = \text{var} \end{cases} \quad (22)$$

Используя значения $R_{p,\mu}$ и $d_{p,\mu}$, полученные для трансформанты $Y_p^{(\mu)}$, а также зависимость (21), для трансформанты $Y_p^{(\mu)}$ могут быть определены битовые плоскости, которые могут быть исключены еще на подготовительном этапе работы метода. Такими являются битовые плоскости $Y^{(p,\mu)}$, соответствующие значениям битовых скоростей, стремящихся к $R_p^{\max}$, при незначительных величинах СКО.

При этом, если для трансформанты $Y_p^{(\mu)}$ выявлены битовые плоскости, которые могут быть исключены, отбрасываются также битовые плоскости соседних трансформант вектора $S_{i,m}$, имеющих одинаковые индексы разрядности, если их интерполированные значения $R_{p,\mu}$ и $d_{p,\mu}$ отличаются от величин $R_{p,\mu}$ и $d_{p,\mu}$ незначительно.

Определение множества $Y_p^{(\mu)'}$ отсекаемых БП трансформанты $Y_p^{(\mu)}$ при этом может быть описано выражением:

$$\begin{aligned} Y_p^{(\mu)'} &= \{Y^{(p,\mu)}\} | R_{p,\mu} \rightarrow R_p^{\max}, d_{p,\mu} \rightarrow d_p^{\min} \\ R_p^{\max} &= \max \{R_{p,\mu}\}, d_p^{\min} = \min \{d_{p,\mu}\} \end{aligned} \quad (23)$$

где $R_p^{\max}$ – максимальное значение битовой скорости битовой плоскости трансформанты $Y_p^{(\mu)}$, $d_p^{\min}$ – минимальное значение СКО битовой плоскости трансформанты $Y_p^{(\mu)}$.

Кроме подхода, заключающегося в усечение битовых плоскостей одного разряда, при незначительном отличии их интерполированных величин $R_{p,\mu}$ и $d_{p,\mu}$, с целью снижения общего объема вычислений может быть использовано подобие между трансформантами.

Суть данного подхода заключается в следующем. Если для интерполированных значений СКО и битовых скоростей по всем битовым плоскостям трансформант $Y_{p-1}^{(\mu)}$, $Y_p^{(\mu)}$ и $Y_{p+m}^{(\mu)}$ вектора $S_{j,m}$ справедливо:

$$\begin{cases} R_{m,\mu} \approx R_{m+1,\mu} \approx \dots \approx R_{m+g,\mu} \\ d_{m,\mu} \approx d_{m+1,\mu} \approx \dots \approx d_{m+g,\mu} \end{cases}, \quad \mu = 1, n, \quad (24)$$

где m – индекс трансформанты в векторе $S_{j,m}$, то вычислений сочетаний битовых плоскостей для трансформант $Y_p^{(\mu)}$ и $Y_{p+m}^{(\mu)}$ вектора $S_{j,m}$ не производится. В этом случае, вместо обработки трансформант на p -м и $p+g$ -м шагах, кодеру сообщается признак подобия, определяющий стратегию обработки, которая будет применяться к трансформантам.

Выводы

Разработана методологическая база построения алгоритмов управления интенсивностью битовой скорости видеопотока, способствующая адаптации интенсивности транслируемого видео к изменяющейся пропускной способности канала.

Управляемыми параметрами видеопотока при этом являются битовые плоскости трансформант кадра, а именно – их количество и позиция в трансформанте, в зависимости от величины требуемой битовой скорости последовательности кадров, транслируемых в единицу времени.

Учет степени информативности трансформант в пределах каждого кадра передаваемой последовательности, а также типа обрабатываемого кадра, способствует снижению вносимой погрешности при обработке, минимизируя ее.

Рассмотрены условия и способы обеспечения эффективной передачи видеопотока с использованием рассмотренной методики. С целью повышения производительности управляющего метода, предложены пути повышения быстродействия, основанные на снижении количества информации, подлежащей обработке, за счет исключения из рассмотрения наименее информативных составляющих трансформант кадров, дающих минимальный уровень СКО на стороне приема.

Литература

1. Баранник В., Двухглазов Д., Твердохлеб В. Метод динамического управления битовой скоростью видеопотока с использованием трехмерного представления трансформант. // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики, 2014. – №176. – С. 37 – 43.
2. Сэломон, Д. Сжатие данных, изображений и звука / Д. Сэломон. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.
3. Баранник В.В. Методологические рекомендации по совершенствованию технологии снижения интенсивности кодового представления базовых кадров / В.В. Баранник, О.Ю. Отман Шади, А.А. Подорожняк // Системи обробки інформації, 2014. – № 8(124). – С. 87-92.
4. Ян Ричардсон. Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 – стандарты нового поколения. – Москва: Техносфера, 2005. – 368 с.
5. Гонсалес Р.С. Цифровая обработка изображений/ Р.С. Гонсалес, Р.Э. Вудс. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.