

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ИНФОРМАТИВНОСТИ СЛОТА Р-КАДРОВ НА ОСНОВЕ ВЫЯВЛЕНИЯ СТРУКТУРНО-ГРАДИЕНТНЫХ МЕЖТРАНСФОРМАНТНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Разрабатывается модель оценки битовой интенсивности слотов Р-кадров на основе эффективного синтаксического представления информативных дифференциально-описанных спектрограмм с учетом обобщенной характеристики градиентного пространства локально-структурных (градиентных) ограничений. Показывается, что такой тип структурных закономерностей обусловлен целым рядом причин, а именно: наличие коррелированности между видеокадрами; незначительные изменения освещенности объектов видеосцен; зависимости между компонентами ДКП соседних трансформант; предварительное снижение динамического диапазона элементов спектрограмм в результате их дифференциального описания. Обосновываются потенциальные характеристики создаваемого подхода относительно дополнительного снижения битовой интенсивности динамического информационного ресурса.

1. Введение

Постановка проблемы и анализ литературы. Снижение безопасности информации и качества предоставления видеoinформационных услуг с использованием инфокоммуникаций в значительной степени вызвано превышением битовой интенсивности видеопотока относительно пропускной способности сети [1]. Такое противоречие особенно обостряется в условиях селективной обработки видеопотока на основе закрытия базового кадра.

Использование технологий обработки видеопотока обеспечивает уменьшение его битовой интенсивности. Здесь применяются такие технологии как MPEG [2 – 4]. В то же время такое синтаксическое представление потока кадров связано с внесением потерь целостности информации и дополнительными временными задержками на обработку. Интегрирование в информационные системы базовых технологий обработки динамических видеоресурсов (ДВИР) неоднозначно влияет на эффективность их функционирования. Особенно это проявляется в случае необходимости беспроводного доступа к ДВИР, источник формирования которых находится на значительных расстояниях. Значит, актуальным требованием, определяющим *научно-прикладную задачу*, является создание систем эффективного синтаксического представления динамических видеoinформационных ресурсов в режимах сохранения необходимого уровня безопасности информации и сокращения сложности реализации кодеков. Для решения такой задачи необходимо построение технологий обработки ДВИР с использованием методов, устраняющих межкадровую избыточность с учетом форм представления информации на внутрикадровом уровне [5]. Для MPEG-технологий обработка потока кадров проводится по группам с применением процесса формирования Р-кадров, т.е. образования слотов Р-кадров [4]. Поэтому *цель исследования* заключается в создании математической модели для оценки информативности слота Р-кадров на основе выявления межкадровых закономерностей.

2. Обоснование подхода для эффективного синтаксического представления слота Р-кадров

Для повышения эффективности формирования и обработки кадров Р-типа *предлагается* предварительно осуществлять трансформирование видеокadra из пространственно-временного в пространственно-спектральное описание. После получения трансформант двумерного преобразования проводится построение дифференциального представления на основе формирования величин разностей между соответствующими компонентами по позициям в кадрах.

В результате этого группа Y_T трансформированных кадров заменяется на совокупность, состоящую из одного базового трансформированного кадра $Y(1)$ и последовательности E_{T-1} дифференциально представленных трансформированных кадров $E(\tau)$, $\tau = \overline{2, T}$, т.е. $Y_T \rightarrow \{Y(1); E_{T-1}\}$. В данной формуле составляющая E_{T-1} представляет собой последовательность длиной $(T-1)$ кадр и записывается как $E_{T-1} = \{E(2), \dots, E(T)\}$. Здесь каждый дифференциально описанный трансформированный (ДОТ) кадр $E(\tau)$ образуется по совокупности двумерных массивов $E(\tau)_{\chi, \gamma}$ размером $w \times w$ элементов. При этом срез по τ составляющей в последовательности ДОТ кадров образует слот ДОТ кадров, состоящий из последовательности двумерных массивов $E(\tau)_{\chi, \gamma}$ для $\tau = \overline{2, T}$. Слот $E(T-1)_{\chi, \gamma}^{(2)}$ ДОТ кадров представляется следующим выражением:

$$E(T-1)_{\chi, \gamma}^{(2)} = \{E(2)_{\chi, \gamma}, \dots, E(\tau)_{\chi, \gamma}, \dots, E(T)_{\chi, \gamma}\},$$

где $E(T-1)_{\chi, \gamma}^{(2)}$ – последовательность (слот) двумерных массивов с координатами $(\chi; \gamma)$ в ДОТ кадрах длиной $(T-1)$.

Слот $E(T-1)_{\chi, \gamma}^{(2)}$ фактически представляет собой сквозную квадратную трубу, вырезанную вдоль последовательности ДОТ кадров на позиции $(\chi; \gamma)$, в каждом сечении которого находится двумерный массив $E(\tau)_{\chi, \gamma}$ дифференциального описания трансформированного кадра.

Далее *предлагается* обработку Р-кадров проводить в межтрансформантном направлении по временной оси по слотам. Для этого нужно выявить структурные свойства слотов Р-кадров с учетом структурных особенностей дифференциально-описанных трансформант. При этом для повышения чувствительности выявления закономерностей относительно динамического изменения содержания слотов предлагается ввести такую структурную единицу как дифференциально описанная спектрограмма $E^{(k, \ell)}$.

Дифференциально описанная спектрограмма (ДОС) $E^{(k, \ell)}$ представляет собой срез вдоль слота по координате $(k; \ell)$ в каждой трансформанте, т.е.

$$E^{(k, \ell)} = \{e(2)^{(k, \ell)}, \dots, e(\tau)^{(k, \ell)}, \dots, e(T)^{(k, \ell)}\}.$$

Структурной характеристикой ДОС является динамический диапазон $d_e^{(k, \ell)}$ ее элементов. Поскольку в общем случае межтрансформантные разности $e(\tau)^{(k, \ell)}$ принимают как положительные, так и отрицательные значения, величина $d_e^{(k, \ell)}$ без учета знака находится по формуле $d_e^{(k, \ell)} = \max_{2 \leq \tau \leq T} \{|e(\tau)^{(k, \ell)}|\}$, где $d_e^{(k, \ell)}$ – динамический диапазон элементов $(k; \ell)$ -й дифференциально описанной спектрограммы без учета знака величин $e(\tau)^{(k, \ell)}$; $|e(\tau)^{(k, \ell)}|$ – абсолютное значение межтрансформантной разности между $(\tau-1)$ -й и τ -й трансформантами.

Для ДОС характерны следующие закономерности (свойства). *Первое свойство.* Динамический диапазон для элементов ДОС в низкочастотной области трансформант больше, чем динамический диапазон для высокочастотной области. *Второе свойство* состоит в том, что значения динамических диапазонов элементов ДОС внутри слота Р-кадров распределены неравномерно. *Третье свойство.* Количество ДОС с высоким динамическим диапазоном меньше, чем количество ДОС с меньшим динамическим диапазоном. *Четвертое свойство.* Для кадров с наличием высокой когерентности динамические диапазоны элементов ДОС в области низкочастотных компонент также имеют ограниченные значения.

3. Разработка модели оценки информативности слота Р-кадров на основе выявления межкадровых закономерностей

Для выполнения требований относительно повышения безопасности динамических ВИР на основе повышения эффективности синтаксического представления слотов Р-кадров с учетом структурных и статистических свойств ДОС *предлагается* выбирать в качестве базового подхода – структурно-комбинаторный принцип описания.

Данный подход базируется на синтезе функционала $F(E^{(k,\ell)})_{\text{apг}}$, задающего синтаксическое представление (аппроксимацию) дифференциально описанной спектрограммы $E^{(k,\ell)}$. При построении функционала $F(E^{(k,\ell)})_{\text{apг}}$ необходимо учитывать, что элементы $e(\tau)^{(k,\ell)}$ ДОС принимают как положительные, так и отрицательные значения, т.е.

$$e(\tau)^{(k,\ell)} = \begin{cases} e(\tau)^{(k,\ell)}, & \rightarrow e(\tau)^{(k,\ell)} \geq 0; \\ -e(\tau)^{(k,\ell)}, & \rightarrow e(\tau)^{(k,\ell)} < 0. \end{cases}$$

Отсюда значения элементов $e(\tau)^{(k,\ell)}$ в общем случае будут изменяться в диапазоне $e_{\min}^{(k,\ell)} \leq e(\tau)^{(k,\ell)} \leq e_{\max}^{(k,\ell)}$. Здесь приняты такие обозначения: $e_{\min}^{(k,\ell)}$ – минимальное значение элемента в ДОС, вычисляемое как: $e_{\min}^{(k,\ell)} = \min_{2 \leq \tau \leq T} \{e(\tau)^{(k,\ell)}\}$; $e_{\max}^{(k,\ell)}$ – максимальное значение элемента в ДОС, которое определяется по формуле $e_{\max}^{(k,\ell)} = \max_{2 \leq \tau \leq T} \{e(\tau)^{(k,\ell)}\}$.

Соответственно, динамический диапазон $\bar{d}_e^{(k,\ell)}$ с учетом разброса в области положительных и отрицательных значений будет равен $\bar{d}_e^{(k,\ell)} = |e_{\min}^{(k,\ell)} - e_{\max}^{(k,\ell)}| + 1$.

Максимальная битовая интенсивность $V(T-1)_e^{(k,\ell)}$ синтаксического представления ДОС на основе структурно-комбинаторного подхода для заданного значения динамического диапазона $\bar{d}_e^{(k,\ell)}$ оценивается по формуле

$$V(T-1)_e^{(k,\ell)} = ((T-1)[\log_2 \bar{d}_e^{(k,\ell)}] + 1).$$

Анализ полученного выражения позволяет заключить, что поскольку динамический диапазон ДОС не превышает значения динамических диапазонов для спектрограммы и для последовательности элементов исходных кадров группы, то в результате предложенного подхода создаются условия для повышения эффективности синтаксического представления динамического ВИР.

Однако необходимо выделить недостатки такого подхода относительно формирования синтаксического представления ДОС, которые связаны с тем, что:

- длина $(T-1)$ дифференциально описанной спектрограммы выбирается заранее и является фиксированной на локальном промежутке видеопотока;
- динамический диапазон элементов ДОС определяется по факту обработки фиксированного количества межтрансформантных разностей.

Это может привести к потере адаптивности относительно изменения структурных и статистических характеристик кадров группы. В результате увеличивается битовая интенсивность потока Р-кадров.

Для устранения недостатков *предлагается* разрабатывать направление, базирующееся на дополнительном выявлении закономерностей, основанных на учете локально-структурных свойств для дифференциально описанных спектрограмм в направлении временной оси. Данный вариант базируется на дополнительном выявлении закономерностей, основанных на учете локально-структурных свойств ДОС для последовательности смежных видеокад-

ров. Такое свойство заключается в наличии закономерности относительно ограниченного значения градиента между значениями соседних элементов ДОС.

Величина градиента $g(\tau)^{(k,\ell)}$ между информативными элементами ДОС задается следующей формулой:

$$g(\tau)^{(k,\ell)} = |e(\tau+1)_{\text{inf}}^{(k,\ell)} - e(\tau)_{\text{inf}}^{(k,\ell)}|c,$$

где $e(\tau)_{\text{inf}}^{(k,\ell)}$, $e(\tau+1)_{\text{inf}}^{(k,\ell)}$ – информативные элементы $(k; \ell)$ -й интерполированной ДОС соответственно расположенных в ней на τ -й и $(\tau+1)$ -й позициях; $g(\tau)^{(k,\ell)}$ – отклонение (градиент) между значениями $(k; \ell)$ -й ДОС для τ -й и $(\tau+1)$ -й трансформант.

По результатам такой обработки для всех информативных элементов интерполируемой $(k; \ell)$ -й ДОС, т.е. $\tau = \overline{1, n_{\text{inf}}}$ формируется вектор градиента $G^{(k,\ell)}$. Это задается следующим соотношением: $G^{(k,\ell)} = \{g(1)^{(k,\ell)}, \dots, g(\tau)^{(k,\ell)}, \dots, g(n_{\text{inf}} - 1)^{(k,\ell)}\}$, где n_{inf} – количество информативных элементов в ИДОС.

Недостатком здесь является то, что мерность градиентного пространства совпадает с мерностью информативной ДОС. Значит, требуется сократить мерность вектора $G^{(k,\ell)}$. В этом направлении *предлагается* для вектора $G^{(k,\ell)}$ градиента информативной ДОС формировать такую характеристику как величина $g(\text{max})^{(k,\ell)}$ динамического диапазона его компонент. Величина $g(\text{max})^{(k,\ell)}$ находится по формуле $0 \leq g(\tau)^{(k,\ell)} \leq g(\text{max})^{(k,\ell)}$.

Здесь $g(\text{max})^{(k,\ell)}$ определяется как $g(\text{max})^{(k,\ell)} = \max_{1 \leq \tau \leq n_{\text{inf}}} \{g(\tau)^{(k,\ell)}\}$.

Данная формула учитывает в процессе определения обобщенного градиентного ограничения только информативные элементы. Это позволяет сузить величину разброса между компонентами ДОС, т.е. уменьшить значение градиентного ограничения. В связи с этим, в дальнейшем предлагается использовать сокращенное описание градиентного пространства. Тогда для информативных элементов ДОС будут выполняться ограничения, заданные следующей системой соотношений:

$$e(\tau)_{\text{inf}}^{(k,\ell)} - g(\text{max})^{(k,\ell)} \leq e(\tau+1)_{\text{inf}}^{(k,\ell)} \leq e(\tau)_{\text{inf}}^{(k,\ell)} + g(\text{max})^{(k,\ell)}, \quad \tau = \overline{1, n_{\text{inf}}}. \quad (1)$$

Величина обобщенного градиентного ограничения $g(\text{max})^{(k,\ell)}$ вычисляется для каждой информативной дифференциально описанной спектрограммы. Это обеспечивает адаптивную подстройку характеристики градиентного пространства под особенности локально-структурных закономерностей межтрансформантных последовательностей (слотов) на каждой частотной составляющей.

Для определения битовой интенсивности созданного синтаксического представления ДОС с учетом ее интерполирования и выявления градиентных ограничений необходимо оценить соответствующую информативность. В соответствии со структурно-комбинаторным подходом для определения степени информативности базовым понятием является количество $Q(n_{\text{inf}}; g(\text{max})^{(k,\ell)})_e$ различных информативных ДОС, длиной n_{inf} , которое можно составить в случае наложения ограничений на динамические диапазоны $\overline{d}(\tau)_{\text{inf}}^{(k,\ell)}$ изменения значений их элементов $e(\tau)_{\text{inf}}^{(k,\ell)}$ в условиях выявления локально-структурных закономерностей.

Для определения величин $\overline{d}(\tau)_{\text{inf}}^{(k,\ell)}$ элементов $e(\tau)_{\text{inf}}^{(k,\ell)}$ информативной дифференциальной по описанной спектрограммы $E_{\text{inf}}^{(k,\ell)}$ используется выражение (1). Анализ данного выражения позволяет заключить следующее:

1. Динамический диапазон первого элемента $e(1)_{\text{inf}}^{(k,\ell)}$, $\tau=1$, оценивается из условия независимости от значений последующих элементов информативной ДОС. Тогда его динамический диапазон $\bar{d}(1)_{\text{inf}}^{(k,\ell)}$ будет равен общему динамическому диапазону $\bar{d}_e^{(k,\ell)}$ последовательности $E_{\text{inf}}^{(k,\ell)}$, т.е.

$$\bar{d}(1)_{\text{inf}}^{(k,\ell)} = \bar{d}_e^{(k,\ell)} = |e_{\text{min}}^{(k,\ell)} - e_{\text{max}}^{(k,\ell)}| + 1. \quad (2)$$

2. Величина $\bar{d}(\tau)_{\text{inf}}^{(k,\ell)}$ динамического диапазона остальных элементов ДОС, $\tau = \overline{2, n_{\text{inf}}}$, в соответствии с формулой (2) будет формироваться с учетом градиента относительно предыдущего значения. Поэтому величина $\bar{d}(\tau)_{\text{inf}}^{(k,\ell)}$ будет оцениваться как

$$\bar{d}(\tau)_{\text{inf}}^{(k,\ell)} = 2 g(\text{max})^{(k,\ell)} + 1, \quad \tau = \overline{2, n_{\text{inf}}}. \quad (3)$$

В таком случае динамический диапазон элементов информативной ДОС на позициях $2 \leq \tau \leq n_{\text{inf}}$ полностью определяется значением $g(\text{max})^{(k,\ell)}$ обобщенной характеристики градиентного пространства.

Значит, на максимальные абсолютные значения (спецификации) элементов $e(\tau)_{\text{inf}}^{(k,\ell)}$ последовательности $E_{\text{inf}}^{(k,\ell)}$ в градиентном пространстве $G^{(k,\ell)}$ наложены ограничения, записываемые следующей системой неравенств:

$$|e(\tau)_{\text{inf}}^{(k,\ell)}| = \begin{cases} \bar{d}_e^{(k,\ell)}, & \rightarrow \tau=1; \\ 2 g(\text{max})^{(k,\ell)} + 1, & \rightarrow 2 \leq \tau \leq n_{\text{inf}}. \end{cases} \quad (4)$$

Отсюда формулируем следующие определения.

Определение 1 (комбинаторная трактовка). Комбинации $E_{\text{inf}}^{(k,\ell)}$, составленные из элементов $e(\tau)_{\text{inf}}^{(k,\ell)}$, удовлетворяющие спецификациям в соответствии с системой соотношений (4), будем называть перестановками с повторениями, на динамические диапазоны элементов которых наложены двухтиповые ограничения.

Определение 2 (структурная трактовка). Последовательности $E_{\text{inf}}^{(k,\ell)}$, элементы которых имеют ограничения на динамический диапазон в соответствии с выражениями (2) и (3), будем называть дифференциально описанными спектрограммами с двухкомпонентными локально-структурными ограничениями (двухкомпонентными градиентными ограничениями).

С учетом этого величина $Q(n_{\text{inf}}; g(\text{max})^{(k,\ell)})_e$, определяемая как количество различных дифференциально-описанных спектрограмм с двухкомпонентными градиентными ограничениями $\{\bar{d}_e^{(k,\ell)}; g(\text{max})^{(k,\ell)}\}$, будет оцениваться с помощью такого выражения:

$$Q(n_{\text{inf}}; g(\text{max})^{(k,\ell)})_e = \prod_{\tau=1}^{n_{\text{inf}}} \bar{d}(\tau)_{\text{inf}}^{(k,\ell)} = \bar{d}_e^{(k,\ell)} \cdot (g(\text{max})^{(k,\ell)})^{n_{\text{inf}} - 1}.$$

Отсюда количество двоичных разрядов $V(n_{\text{inf}}; g(\text{max})^{(k,\ell)})_e$ на синтаксическое представление информативной ДОС в двухкомпонентном градиентном пространстве ограничений определяется по формуле

$$V(n_{\text{inf}}; g(\text{max})^{(k,\ell)})_e = [\ell \log_2 \bar{d}_e^{(k,\ell)}] + (n_{\text{inf}} - 1) [\ell \log_2 (g(\text{max})^{(k,\ell)})] + 2.$$

Полученное выражение позволяет оценить максимальную битовую интенсивность $V(n_{\text{inf}}; g(\max)^{(k,\ell)})_e$ синтаксического представления информативной ДОО на основе структурно-комбинаторного подхода с учетом ее интерполирования и выявления двухкомпонентных градиентных ограничений $\{ \bar{d}_e^{(k,\ell)}; g(\max)^{(k,\ell)} \}$.

4. Выводы

1. Разработана модель оценки битовой интенсивности слотов Р-кадров на основе эффективного синтаксического представления информативных ДОО с учетом обобщенной характеристики градиентного пространства локально-структурных (градиентных) ограничений. Такой тип структурных закономерностей обусловлен целым рядом причин, а именно: наличие коррелированности между видеокадрами; незначительные изменения освещенности объектов видеосцен; зависимости между компонентами ДКП соседних трансформант, характерные в области как низких, так и высоких частотных составляющих; предварительное снижение динамического диапазона элементов спектрограмм в результате их дифференциального описания.

Научная новизна. Впервые создана модель оценки информативности эффективного синтаксического представления слотов Р-кадров на основе обработки дифференциально описанных спектрограмм. Отличия заключаются в том, что сокращается межтрансформантная (временная) избыточность, обусловленная наличием таких закономерностей: межкадровая (временная) психовизуальная избыточность на уровне обработки дифференциально описанных спектрограмм, что обусловлено особенностями ограниченной чувствительности зрительной системы относительно коррекции отдельных частотных составляющих; межкадровая (временная) структурная избыточность, обусловленная наличием локально-структурных ограничений между соседними информативными элементами дифференциально описанной спектрограммы. Это обеспечивает оценку минимального уровня снижения битовой интенсивности видеопотока при сохранении требуемой целостности информационного ресурса.

Список литературы: 1. Олифер В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. СПб.: Питер, 2006. 958 с. 2. Миано Дж. Форматы и алгоритмы сжатия изображений в действии: учебное пособие / Дж. Миано. Пер. с англ. М.: Триумф, 2003. 336 с. 3. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука / Д. Сэломон. М: Техносфера, 2004. 368 с. 4. Баранник В.В. Структурно-комбинаторное представление данных в АСУ / В.В. Баранник, Ю.В. Стасев, Н.А. Королева. Х.: ХУПС, 2009. 252 с. 5. Акимов Р.И. Технология кодирования пакетов предсказанных кадров в инфокоммуникационных системах // Сучасна спеціальна техніка. 2012. № 4. С. 17 – 18.

Поступила в редколлегию 11.09.2015

Баранник Владимир Викторович, д-р техн. наук, профессор, начальник кафедры Харьковского университета Воздушных Сил им. И. Кожедуба. Научные интересы: кодирование и защита информации для передачи в телекоммуникационных системах. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Сумская, 77/79. E-mail: barannik_v_v@mail.ru.

Шульгин Сергей Сергеевич, соискатель Киевского Национального авиационного университета, г. Киев. Научные интересы: обработка видеоинформации и безопасность инфокоммуникационных систем. Адрес: Украина, 01000, Киев, пр. Космонавта Комарова, 1.