

УДК 519.688

DOI: 10.18413/2518-1092-2025-10-2-0-3

**Стеценко О.Н.
Хлопов В.В.
Акиншин Д.И.
Минченко Е.С.****РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ МУЛЬТИАГЕНТНОГО
ПОДХОДА К КОДИРОВАНИЮ ВИДЕОДАНЫХ**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
ул. Костюкова, 46, Белгород, 308012, Россия

e-mail: stetsenkoon81@yandex.ru

Аннотация

Целью исследования является разработка концепции мультиагентного подхода к кодированию видеоданных для повышения качества видеоряда и увеличения битовой скорости за счет использования мультиагентной системы. Следствием увеличения объемов мультимедийной информации, а также существующих ограничений стандартных кодеков, являются условия, в которых поддержание качества видеоряда на нужном уровне не может быть гарантировано. В частности, существующие схемы обработки не обладают гибкостью в плане возможности коррекции параметров обработки предшествующих этапов кодирования относительно текущего. Возможным решением данной проблематики может служить децентрализация процесса кодирования с одновременным отходом от жесткого конвейерного сценария. В работе рассматривается подход к обработке кадров видеопотока на основе мультиагентной системы. Предлагается концепция мультиагентной системы, ориентированной на реализацию механизмов кодирования видеопотока на основе стандартных схем базовой технологии обработки MPEG-семейства. Рассмотрена обобщенная структура мультиагентной системы, типовых агентов (внутренней, а также межкадровой обработки), а также логика их взаимодействия. Основной упор сделан на внутрикадровую обработку. Отдельно рассмотрены возможные режимы работы мультиагентной системы, а именно – обучающий, основной и режим коррекции. В рамках предлагаемого подхода обрабатываемым кадрам, исходя из особенностей их содержания, ставится в соответствие совокупность параметров кодера, которые в дальнейшем могут корректироваться, исходя из полученной величины битовой скорости и текущего уровня ошибки. За счет этого возможно достичь существенного сокращения времени обработки как следствие значительного сужения пространства возможных значений параметров кодирования.

Ключевые слова: мультиагентная система; архитектура МАС; интеллектуальный агент; распознавание видеок кадров; обработка видеоданных; кодирование видео; искусственный интеллект

Для цитирования: Стеценко О.Н., Хлопов В.В., Акиншин Д.И., Минченко Е.С. Разработка концепции мультиагентного подхода к кодированию видеоданных // Научный результат. Информационные технологии. – Т.10, №2, 2025. С. 25-37. DOI: 10.18413/2518-1092-2025-10-2-0-3

**Stetsenko O.N.
Khlopov A.M.
Akinshin D.I.
Minchenko E.S.**

**DEVELOPMENT OF THE CONCEPT
OF A MULTI-AGENT APPROACH TO VIDEO
DATA ENCODING**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia

e-mail: stetsenkoon81@yandex.ru

Abstract

The aim of the study is to develop a concept of a multi-agent approach to video data coding to improve the quality of the video sequence and increase the bit rate through the use of a multi-agent system. The increase in multimedia data volume and the existing limitations of standard codecs lead to conditions where maintaining the required video stream quality cannot be guaranteed. In particular, existing processing schemes lack flexibility regarding the possibility of correcting processing parameters of preceding encoding stages relative to the current one. A possible solution to this problem could be the decentralization of the encoding process coupled with a departure from a rigid pipeline scenario. This paper considers an approach to video stream frame processing based on a multi-agent system. A concept for a multi-agent system oriented towards implementing video stream encoding mechanisms based on standard processing schemes of the MPEG family technology is proposed. The generalized structure of the multi-agent system, typical agents (intra-frame and inter-frame processing), and their interaction logic are discussed. The main focus is placed on intra-frame processing. Possible operating modes of the multi-agent system are separately considered, namely – training, main, and correction modes. Within the proposed approach, processed frames are associated with a set of encoder parameters based on their content characteristics, which can subsequently be corrected based on the obtained bitrate and the current error level. This allows for a significant reduction in processing time as a result of significantly narrowing the space of possible encoding parameter values.

Keywords: multi-agent system; MAS architecture; intelligent agent; video frame recognition; video data processing; video encoding; artificial intelligence

For citation: Stetsenko O.N., Khlopov A.M., Akinshin D.I., Minchenko E.S. Development of the concept of a multi-agent approach to video data encoding // Research result. Information technologies. – Т.10, №2, 2025. – P. 25-37. DOI: 10.18413/2518-1092-2025-10-2-0-3

СУЩНОСТЬ И ОСОБЕННОСТИ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ

Какой угодно технологический цикл классической (монолитной) архитектуры условно может быть рассмотрен как совокупность отдельных технологических этапов, связанных меж собой.

При этом он может иметь как линейную, так и разветвленную структуру.

Как для первого, так и для второго случая цикл включает в себя определенное общее количество ξ технологических операций. В некоторых случаях такое количество действий должно быть выполнено в реальном времени, иначе говоря, время обработки t_{sh} на конечном узле должно быть минимальным:

$$t_{sh} \rightarrow 0 \quad (1)$$

В таких условиях, с одной стороны, уменьшению величины t_{sh} способствует распараллеливание вычислительного процесса на несколько логических независимых потоков.

С другой стороны, ряд технологических процессов построен по конвейерной архитектуре – то есть последующий этап обработки требует в качестве исходных данных результатов вычислений предыдущего этапа, что ограничивает подход с использованием распараллеливания вычислений.

В отличие от монолитных систем, мультиагентная система (МАС) может рассматриваться как совокупность независимых обработчиков – интеллектуальных агентов (ИА), задействованных в

едином технологическом цикле [1].

Такой способ организации МАС позволяет:

- существенно уменьшить время для выполнения вычислительных действий за счет делегирования функций каждого из технологических этапов отдельным агентам;

- обеспечить значительно более высокие показатели качества результата выполнения процесса вычисления.

Этому, в свою очередь, способствуют основные свойства МАС, а именно:

- **автономность** – то есть агенты, хотя бы частично, независимы между собой;

- **децентрализация** – общий управляющий агент, задающий работу всей МАС, отсутствует;

- **ограниченность представления** – ни один из агентов «не представляет» всей структуры системы, или система достаточно сложна, чтобы «знание» о ней имело практическое значение для агента.

- **самоорганизация** – агенты выполняют задачи поиска оптимальных решений без внешнего вмешательства;

- **гибкость** – система может быть дополнена или модифицирована без изменения ее структуры.

Применение мультиагентной системы для обработки видеоданных в реальном времени [2-4].

Для уменьшения требуемого количества вычислений и времени обработки предполагается применение МАС в ходе кодирования видео. При этом схема MPEG формируется множеством A агентов обработки, а именно:

$$A = \{\alpha_{cs}; \alpha_{sd}; \alpha_{op}; \alpha_q; \alpha_{en}; \beta_{gs}\} \quad (2)$$

где α_{cs} – агент смены цветовой схемы;

α_{sd} – агент выбора модели цветовой субдискретизации;

α_{op} – агент, обеспечивающий процесс ортогонального превращения;

α_q – агент квантования;

α_{en} – агент кодирования;

β_{gs} – агент построения группы кадров.

Формула (2) показывает, что агенты разделены на группы α и β . Здесь группу α формируют агенты, совершающие те или иные действия в ходе внутрикадровой обработки [5, 6].

В то же время, агент группы β выполняет обработку видео после обработки отдельных кадров, отвечая за выбор длины и особенности построения группы кадров на этапе формирования видеопотока. То есть, производит обработку в плоскости времени.

Общий алгоритм обработки на базе МАС в этом случае сводится к выбору и применению оптимальных E' опций кодировки для каждого этапа.

При этом, из формулы (2) агент α_{cs} может быть исключен при условии, что общий процесс обработки использует только одну ярко-хроматическую цветовую модель, например YUV, следовательно, какие-либо опции при этом отсутствуют.

С учетом всего вышесказанного общий перечень действий в ходе кодирования видео на базе МАС будет следующим:

1. Определение множества оптимальных параметров кодирования для каждого из агентов на базе сведений о требованиях Q к качеству реконструированного видеопотока, т.е.:

$$\{E'\} = f(Q) = \bigcup_{i=1}^n \bar{E}'_i, \quad (3)$$

где \bar{E}'_i – оптимальные параметры кодирования для одного агента МАС (одного этапа обработки).

При этом для каждого i -го агента МАС перечень оптимальных опций определяется с использованием общих требований Q и параметров видеоданных – в частности, текущего уровня качества Q_{i-1} после обработки на предыдущем шаге, требований по битовой скорости B видео потока и прогнозируемой битовой скорости с учетом обработки на $(i-1)$ -му шагу, т.е. B_{i-1} :

$$\bar{E}'_i = \psi(Q; B; Q_{i-1}; B_{i-1}), \quad (4)$$

где B и Q – доступная результирующая величина битовой скорости кодируемого видеопотока, поступающая в выходной буфер передатчика, и установленные параметры качества;

B_{i-1} и Q_{i-1} – величина битовой скорости кодируемого видео потока, и, соответственно, показатели качества после $(i-1)$ -го шага обработки.

2. Применение определенных оптимальных параметров кодировки. При этом выполняется:

- обработка данных по алгоритму, определенному общей базовой технологией для данного МАС;

- вычисление величин B_i и Q_i , полученных в результате обработки;

- передача обработанных данных и значений величин B_i и Q_i $(i+1)$ -му агенту.

3. Корректировка множества $\{E'\}$.

Схематически данный процесс может быть изображен, как показано на рис. 2.

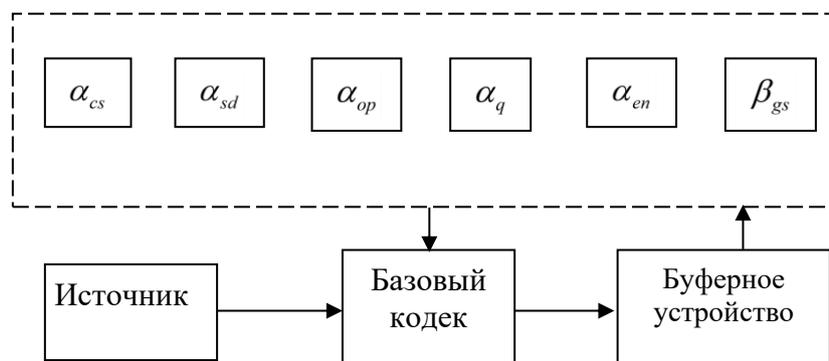


Рис. 1. Общая схема мультиагентной обработки видеопотока

Fig. 1. General scheme of multi-agent video stream processing

ОБЩАЯ СТРУКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АГЕНТА МАС

Классический алгоритм обработки данных, входящий в многоэтапную монолитную конвейерную систему, в общем случае обеспечивает исключительно преобразование полученной информации предварительно заданным способом.

В отличие от такого способа обработки, интеллектуальный агент в ходе работы может выполнять следующий перечень действий:

- прием и анализ полученных данных;

- определение особенности сценария обработки на базе выявленных закономерностей в ходе анализа данных;

- выбор и применение набора опций обработки в соответствии с определенным сценарием;

- оценка полученных величин B_{i-1} и Q_{i-1} и ведение статистики зависимостей параметров

кодирования \bar{E}'_i и значений B_{i-1} и Q_{i-1} .

Для каждого фрагмента, подлежащего обработке, предварительно выполняется оценка особенностей его содержания. В частности, предполагается наличие градации типов фрагментов по ряду признаков, например:

- по признаку происхождения (фотоматериал, компьютерная графика или комбинация указанных двух типов);
- по цветовой схеме (полно цветное изображение или оттенки одного цвета);
- по информативности (наличие контурной информации или текстур).

Особенности фрагмента, определяемого комбинацией признаков [7, 8], определяют особенности обработки каждым из агентов MAC, как это показано в таблице 1.

Таблица 1

Определение особенностей обработки фрагмента в MAC по совокупности признаков

Table 1

Determination of the features of fragment processing in MAC by a set of features

Происхождение (P)	Фото (F)	Компьютерная графика (G)	Комбинированный (C)
Цветовая схема (Φ)	RGB	Оттенок одного канала ($1CH$)	Биадическая (B)
Информативность (I)	Высокая (H)	Средняя (M)	Низкая (L)

На основе определенных особенностей формируется 27 изначальных признаков комбинаций $\Phi(P; \Theta; I)$, задающих начальный набор опций обработки для всей системы MAC (таблица 2) [9, 10].

Таблица 2

Признаковые комбинации для выбора начальных опций обработки видеокадров в MAC

Table 2

Feature combinations for selecting initial options for processing video frames in MAC

Признаковая комбинация $\Phi(P; \Theta; I)$	Предварительные параметры кодирования	
	Модель цветовой субдискретизации (ξ)	Шаг квантования ($K = \overline{1; 12}$)
(F)(RGB)(H)	4:4:4-4:2:2	1-2
(F)(RGB)(M)	4:2:2	2
(F)(RGB)(L)	4:2:1-4:2:0	3-4
(F)(1CH)(H)	4:1:1	4-5
(F)(1CH)(M)	4:1:1	5-6
(F)(1CH)(L)	4:1:1	6-8
(F)(B)(H)	4:0:0 (канал Y)	6-8
(F)(B)(M)	4:0:0 (канал Y)	6-8
(F)(B)(L)	4:0:0 (канал Y)	8-10
(G)(RGB)(H)	4:2:2	2-3
(G)(RGB)(M)	4:1:1	3-4
(G)(RGB)(L)	4:1:1	4-5
(G)(1CH)(H)	4:1:0	6-8
(G)(1CH)(M)	4:1:0	8-10
(G)(1CH)(L)	4:1:0	10-12
(G)(B)(H)	4:0:0 (канал Y)	6-8
(G)(B)(M)	4:0:0 (канал Y)	8-10
(G)(B)(L)	4:0:0 (канал Y)	11-12
(C)(RGB)(H)	4:2:2	2
(C)(RGB)(M)	4:2:1	2-3

(C)(RGB)(L)	4:2:1-4:2:0	3-5
(C)(1CH)(H)	4:1:1	5-6
(C)(1CH)(M)	4:1:1	6-8
(C)(1CH)(L)	4:1:1	8
(C)(B)(H)	4:0:0 (канал Y)	8
(C)(B)(M)	4:0:0 (канал Y)	8
(C)(B)(L)	4:0:0 (канал Y)	8-10

Далее полученной признаковой комбинации $\Phi(P; \Theta; I)$ ставится в соответствие пара значений – модель ξ цветовой субдискретизации и шаг K квантования, потенциально способных обеспечить величины B и Q на приемлемом уровне:

$$\Phi(P; \Theta; I) \rightarrow (\xi, K) \mid (B; Q) \rightarrow \text{suitable}. \quad (5)$$

В свою очередь, множество признаковых комбинаций и связанных с ними величин ξ и K , по которым выполняется условие (5), формирует модель обработки M .

Другими словами, модель обработки является функционалом от $\Phi(P; \Theta; I)$, на базе которого осуществляется выбор определенных значений опций кодировки

Кроме величин ξ и K , сюда входит также выбор алгоритма кодирования η на последнем этапе (по Хаффману, арифметическое, структурно-комбинаторное и другие) и выбор алгоритма μ ортогонального преобразования (ДКП, Уолша, Хаара и другие). Последние два параметра, а именно – η и μ определяются с учетом имеющихся вычислительных возможностей Ξ системы и доступные временные T лимиты. Итак, в этом случае модель обработки может быть описана следующим выражением:

$$M = \varphi(\Phi(P; \Theta; I); \xi; K; \eta, \mu(T; \Xi); B; Q) \mid (B; Q) \rightarrow \text{suitable}. \quad (6)$$

То есть, в физическом смысле модель M определяет для фрагмента изображения по его признакам $\Phi(P; \Theta; I)$ перечень опций кодирования, которые могут обеспечить битовую скорость и качество реконструированного изображения на приемлемом уровне [11]. Понятно, что при этом, при наличии 11 теоретически взаимно зависимых параметров, а именно $P, \Theta, I, \xi, K, \mu, \eta, \Xi, T, B$ и Q общее количество N моделей обработки для всего процесса внутри кадрового кодирования будет не меньше, чем:

$$N \geq 11^v, \quad (7)$$

где v – наименьшее количество градаций одного из параметров модели.

Понятно, что при простейших условиях $v=2$ (что, например, соответствует выбору из двух возможных значений параметра) $N = 121$. На практике же только комбинаций P, Θ и N будет 27.

Таким образом, построение и использование общей модели обработки, как это могло быть в монолитных системах, превращается в почти неразрешимую задачу [12]. Поэтому для существенного сокращения объема расчетов и обеспечения обработки и оптимизации параметров в реальном времени МАС использует частичные модели M' **обработки**, создаваемые для каждого i -го агенту отдельно, т.е.

$$M' = \bigcup_{j=1}^n \alpha_i(\varepsilon_j), \quad (8)$$

где $j = \overline{1, n}$ – возможный диапазон изменения величины параметра ε_j агенту α_i .

В свою очередь, на базе частичной модели обработки выбирается **список параметров обработки**, с использованием которых будут выполнены определенные действия в функциональном модуле. Такие действия определяются тем, каким именно агентом в общей модели МАС они выполняются.

При этом существенное сокращение объема вычислений здесь достигается за счет того, что обычно каждый агент в нашем случае имеет только один изменяющийся параметр.

После выполнения действий в функциональном модуле выполняется фиксация статистических данных (**модуль оперативной статистики**) – тип фрагмента по $\Phi(P; \Theta; I)$, выбранное значение параметра ε_j агента и полученные значения V_i и Q_i . При этом, если величины V_i и Q_i не будут приемлемыми, соответствующая частичная модель будет далее скорректирована.

РЕЖИМЫ РАБОТЫ МАС ПРИ ВНУТРИКАДРОВОМ КОДИРОВАНИИ

Как показывает анализ общих принципов функционирования МАС в ходе кодирования видеоданных, даже при использовании частичных моделей обработки выбор оптимальных параметров сжатия может потребовать значительных объемов корректировок, и при этом не может гарантироваться обработка в реальном времени.

Для решения данной проблематики используется многорежимный подход к функционированию МАС, а именно:

- режим обучения;
- основной режим;
- режим корректировки.

РЕЖИМ ОБУЧЕНИЯ МАС

Обучение МАС представляет собой обработку большого количества разнотипных фрагментов видеокладов, первоначально руководствуясь параметрами кодирования, заданными табл. 1, и установленные значения Q и V . Режим обучения является ключевым в работе МАС и направлен на установку узких диапазонов значений j приемлемого параметра кодирования для каждого из агентов α_i в зависимости от величин P, Θ, I, Ξ, T, V и Q .

По сути, обучение МАС сводится к итерационному поиску опций для каждого из ИА, что обеспечит выполнение условия оптимального кодирования, то есть [13]:

$$V, Q \rightarrow \text{suitable} . \quad (9)$$

Процесс обучения МАС включает в себя такие этапы работы, как:

- определение совокупности признаков обрабатываемого фрагмента;
- оценка величин Ξ и T ,
- применение базового списка опций кодирования, заданных табл.2;
- применение базовых параметров μ, η ;
- оценка текущих V_i и Q_i фрагмента по результатам обработки;
- запись значений избранных μ, η, K и ξ при имеющихся условиях Ξ и T , а также полученных при этом V_i и Q_i в модуль оперативной статистики;
- оценка полученных величин V_i и Q_i на предмет отклонения от оптимальных значений по биминимальному критерию, что может быть описано выражением:

$$\begin{cases} B_i \rightarrow \min \\ Q_i \rightarrow \min \end{cases}; \quad (10)$$

- изменение параметров кодирования в зависимости от наличия и характера отклонения значений B_i и Q_i от критерия (10);

- запись откорректированных значений параметров кодирования, то есть уточнения частичной модели обработки.

Схема формирования долевой модели M' обработки в МАС приведены рисунок 2.

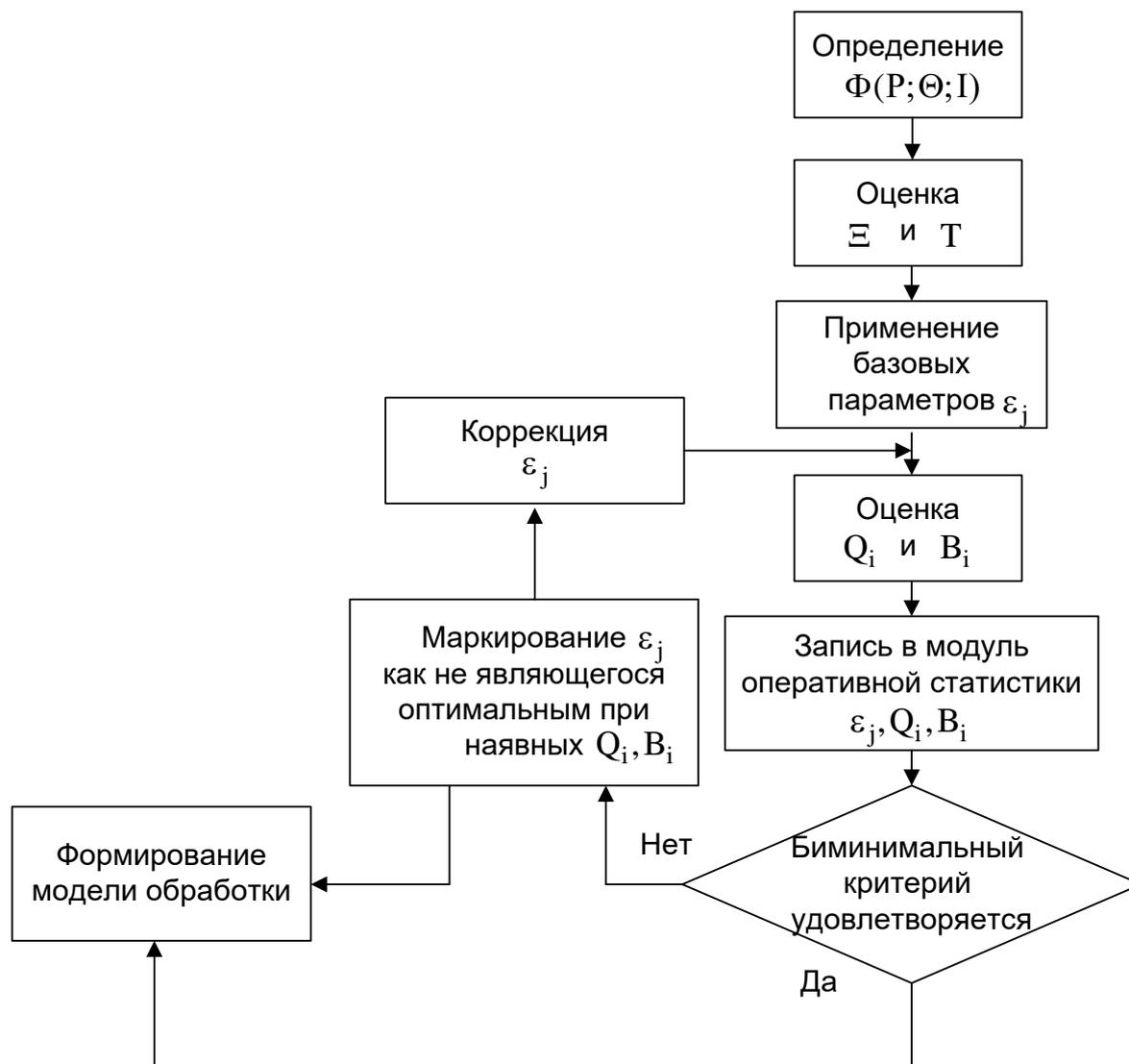


Рис. 2. Схема формирования частичной модели обработки в МАС

Fig. 2. The scheme of forming a partial processing model in MAC

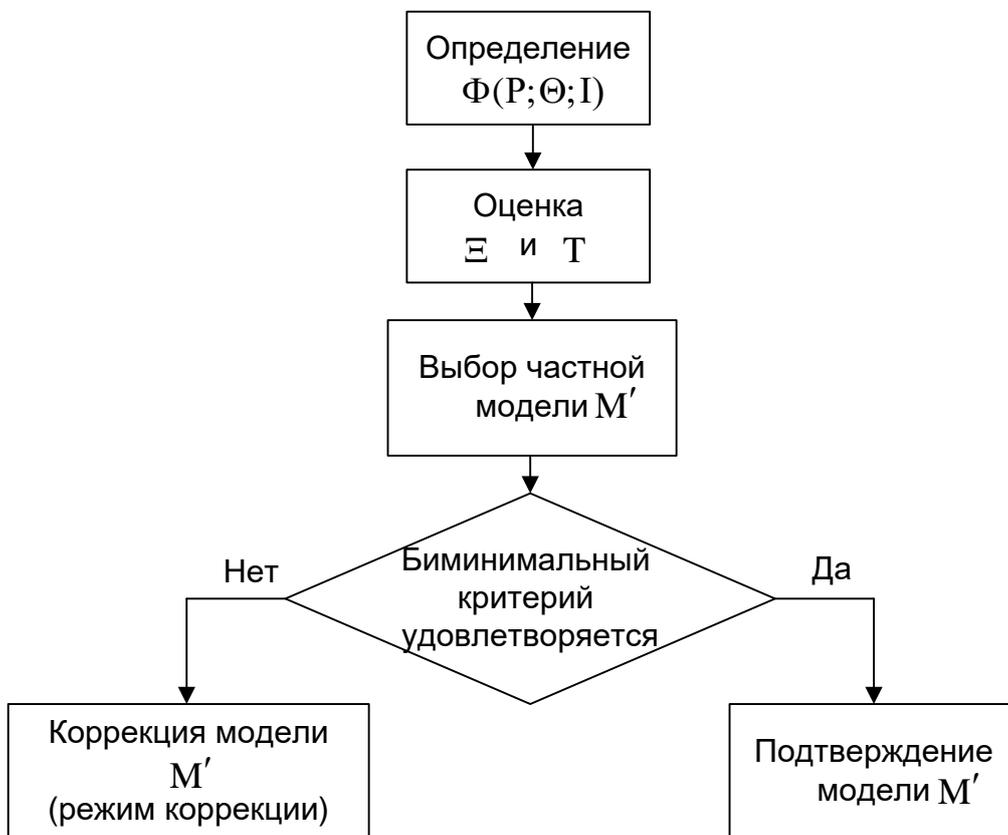
После того, как множество частичных моделей M' обработки сформировано, МАС может работать в основном режиме.

ОСНОВНОЙ РЕЖИМ РАБОТЫ МАС В ХОДЕ КОДИРОВАНИЯ ВИДЕО

При наличии сформированной модели M обработки, как множества частичных моделей M' , в основном режиме работы МАС выполняются следующие действия (рисунок 3):

- оценка величин P, Θ, I, Ξ, T ;

- выбор подходящей модели M' (ε_j в частичных моделях) из сформированного множества (при этом $M' = f(P, \Theta, I, \Xi, T)$);
- оценка соответствия полученных величин B_i и Q_i критерия (10).



В случае, когда величины B_i и Q_i не являются оптимальными, принимается решение об изменении величины параметра ε_j .

РЕЖИМ КОРРЕКТИРОВКИ ПАРАМЕТРОВ MAC

Данный режим является частным случаем основного режима, который активируется в случаях, когда в ходе обработки данных тем или иным ИА возникает необходимость изменения значения параметра ε_j .

Такие изменения выполняются в реальном времени и при текущей обработке i -го сегмента данных будут применены относительно $(i + \mathcal{G})$ -го сегмента ($\mathcal{G} = \overline{1; \infty}$), имеющий такой же набор характерных признаков, как и i -и сегмент, т.е.

$$\Phi(P; \Theta; I)_i = \Phi(P; \Theta; I)_{i+\mathcal{G}}. \quad (11)$$

РАБОТА МАС В РЕЖИМЕ МЕЖКАДРОВОГО КОДИРОВАНИЯ

Данный режим обработки видеоданных может использоваться отдельно от МАС, отвечающей за внутри кадровое кодирование и актуален тогда, когда в ходе работы агентов группы α не было обеспечено:

- выполнение условий (10);
- уменьшение битовой скорости видео потока до такой, когда $B \leq W$, то есть не превышает пропускную способность канала.

В этом случае дополнительное уменьшение битовой скорости видео достигается за счет изменения размерности Λ группы кадров (GOP), содержащая один опорный I -кадр, несколько предусмотренных P -кадров и двунаправленно-предусмотренные кадры (кадры B -типа) [14, 15].

Базовый вариант модели MPEG подразумевает 8 кадров в составе группы [16-18]. Последующие коррекции стандарта привели к увеличению Λ . В частности, рекомендация H.264 позволяет настраивать величину Λ в диапазоне от 8 до 32 кадров. При этом справедливы следующие закономерности:

- количество опорных кадров группы является неизменным для любых значений Λ ;
- множество кадров P и B -типа формируется разницей Ψ изменения сцен в ходе транслирования видео потока между соседними I -кадрами.

На базе этого понятно, что увеличение величины Λ ведет к уменьшению среднего количества бит, приходящихся в группе в кадры P и B -типов [19, 20]. Следовательно, в этом случае средняя битовая скорость кадра из группы будет снижаться.

В общем случае достаточно увеличить Λ до максимального значения, поддерживаемого стандартом. Одновременно с этим, рост Λ приводит к росту вычислительной нагрузки на процессор. Поэтому наиболее приемлемым будет выбор величины Λ учитывая также и параметр Ξ .

Тогда общий перечень параметров, формирующих совокупность характерных признаков Φ' для МАС в межкадровом кодировании, будет содержать:

- ресурс вычислительных возможностей Ξ системы;
- разница Ψ смены сцен видео между соседними I -кадрами;

Другими словами, модель M'' межкадровой обработки может быть представлено выражением:

$$M'' = f(\Phi'(\Psi; \Xi)). \quad (12)$$

Аналогично случаю внутрикадрового кодирования, создается базовое множество разниц Ψ . Далее, по выражению (12), формируется первичное множество моделей, которые далее уточняются в ходе обучения, как и в случае МАС на этапе внутрикадрового кодирования.

ПРЕИМУЩЕСТВА МАС КАК МЕХАНИЗМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА КОДИРОВАНИЯ ВИДЕОДАНЫХ

Исходя из рассматриваемого материала можем сделать следующие выводы относительно преимуществ применения МАС в ходе обработки видеоданных:

- в отличие от традиционных технологических процессов обработки видео, сама архитектура МАС и ИА направлена на обеспечение оптимальных параметров кодирования;
- использование ИА для выбора оптимальных параметров кодирования видеоданных в реальном времени позволяет существенно снизить общий объем действий за счет изменения монолитного процесса конвейерного типа рядом подпроцессов, объем действий в рамках каждого из которых будет существенно ниже;

- на каналах обратной связи работы алгоритмов кодирования на базе МАС, при корректировке параметров ε_j ИА может задействоваться распараллеливание поиска оптимальных опций для нескольких агентов одновременно, что позволяет снизить время обработки;
- на базе сформированного множества моделей обработки выбор оптимальных параметров кодирования фактически сводится к сопоставлению множества характерных признаков обрабатываемого сегмента соответствующей модели обработки, что требует минимум вычислений и временных затрат;
- недостатком подхода к построению процесса кодирования видеоданных на базе МАС является значительное время обучения системы агентов и формирование множества моделей обработки; при этом качество обучения напрямую зависит от содержания изображений, анализируемых системой в данном режиме;
- в случае необходимости корректировки моделей обработки поиск приемлемых параметров для каждого ИА осуществляется в достаточно ограниченном пространстве значений ε_j , т.е. коррекция моделей не вносит существенной временной задержки.

Список литературы

1. Beklaryan G.L., Akopov A.S., Khachatryan N.K. Optimisation of system dynamics models using a real-coded genetic algorithm with fuzzy control // Cybernetics and Information Technologies. 2019. Vol. 19. No. 2. P. 87–103. <https://doi.org/10.2478/cait-2019-0017>
2. Bobashev G., Zule W., Root E., Wechsberg W., Borshchev A., Filippov A. 2004 Geographically-Enhanced Mathematical Models of HIV Dynamics. NIDA Symposium on AIDS, Cancer and Related Problems, St. Petersburg, Russia.
3. Rozhentsova N., Regir O., Kotsubinski A. and Fetisov L. Development of a Multi-Agent Model of Electric Power Consumer/ 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), 2019, pp. 1-4, <https://doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949937>.
4. Иванов Ю.А. Некоторые проблемы сжатия и передачи видео в реальном времени в беспроводных сетях // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2009 – Т. 5 – № 1 – С. 62-64.
5. Hsu W.-L., Tsai Ch.-L., Chen Ch.-J., Multi morphological image data hiding based on the application of Rubik's cubic algorithm. Carnahan Conference on Security Technology (ICCST): proceedings of the IEEE International Conference. 2012. P. 135–139. DOI:10.1109/CCST.2012.6393548.
6. Chen T. et. al.: End-to-End Learnt Image Compression via Non-Local Attention Optimization and Improved Context Modeling. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 3179–3191 [<https://doi.org/10.1109/tip.2021.3058615>].
7. Russ J.C., Neal F.B.: The Image Processing Handbook. 7th Edition. CRC Press, 2018.
8. Rao K. et. al.: JPEG Series. 1st edition. River Publishers, 2021.
9. Information technology – JPEG 2000 image coding system: Secure JPEG 2000. International Standard ISO/IEC 15444-8, ITU-T Recommendation T. 807, 2007. 108 p.
10. Miano J. Formats and image compression algorithms in action / J. Miano. – Kyiv: Triumph, 2013, 336 p.
11. Абламейко С.В. Обработка изображений: технология, методы, применение / С.В. Абламейко, Д.М. Лагуновский, Минск: Амалфея, 2000. – 304 с.
12. Shirani J.S. JPEG compliant efficient progressive image coding / J.S. Shirani, F. Kossentini // Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – Seattle. – 1998. – P. 2633-2636. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.1998.678063>.
13. Miano J. Compressed image file formats: JPEG, PNG, GIF, XBM, BMP / J. Miano. – Moscow: ACM, 1999. – 264 p.
14. Pratt W. Slant transform image coding. Proc. Computer Processing in communications / W.K. Pratt, W.H. Chen, L.R. Welch. – New York: Polytechnic Press, 1969. – 184 p.
15. Efficient hierarchical graph-based video segmentation / M. Grundmann, V. Kwatra, M. Han, I. Essa // 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – San Francisco. – 2010. – P. 2141-2148.
16. Gonzalez R. Digital image processing / R. Gonzalez, K. Woods. – Kyiv: Tekhnosfera, 2018. – 1104 p.
17. Salomon D. Data Compression: The Complete Reference. Fourth Edition / D. Salomon. – London: Springer-Verlag Limited, 2007. – 899 p.

18. Encoding mode selection in HEVC with the use of noise reduction / O. Stankiewicz, K. Wegner, D. Karwowski, J. Stankowski, K. Klimaszewski // International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP). – Poznan, 2017. – P. 1-6.

19. Christophe E. Quality criteria benchmark for hyperspectral imagery / E. Christophe, D. Lager, C. Mailhes // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2005. – № 9(43). – P. 2103-2114.

20. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео / Д. Ватолин, А. Ратушняк, М. Смирнов, В. Юкин. – М.: ДИАЛОГ–МИФИ, 2003. – 384 с.

References

1. Beklaryan G.L., Akopov A.S., Khachatryan N.K. Optimisation of system dynamics models using a real-coded genetic algorithm with fuzzy control // Cybernetics and Information Technologies. 2019. Vol. 19. No. 2. P. 87-103. <https://doi.org/10.2478/cait-2019-0017>.

2. Bobashev G., Zule W., Root E., Wechsberg W., Borshchev A., Filippov A. 2004 Geographically-Enhanced Mathematical Models of HIV Dynamics. NIDA Symposium on AIDS, Cancer and Related Problems, St. Petersburg, Russia.

3. N. Rozhentsova, O. Regir, A. Kotsubinski and L. Fetisov. Development of a Multi-Agent Model of Electric Power Consumer // 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), 2019, pp. 1-4, <https://doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949937>.

4. Ivanov Yu.A. Some Problems of Video Compression and Transmission in Real Time in Wireless Networks // Electrotechnical and Information Complexes and Systems. – 2009 – Vol. 5 – No. 1 – P. 62-64. (In Russian)

5. Hsu W.-L., Tsai Ch.-L., Chen Ch.-J., Multi morphological image data hiding based on the application of Rubik's cubic algorithm. Carnahan Conference on Security Technology (ICCST): proceedings of the IEEE International Conference. 2012. P. 135–139. DOI10.1109/CCST.2012.6393548.

6. Chen T. et. al.: End-to-End Learnt Image Compression via Non-Local Attention Optimization and Improved Context Modeling. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 3179-3191 [<https://doi.org/10.1109/tip.2021.3058615>].

7. Russ J.C., Neal F.B.: The Image Processing Handbook. 7th Edition. CRC Press, 2018.

8. Rao K. et. al.: JPEG Series. 1st edition. River Publishers, 2021.

9. Information technology – JPEG 2000 image coding system: Secure JPEG 2000. International Standard ISO/IEC 15444-8, ITU-T Recommendation T.807, 2007. 108 p.

10. Miano J. Formats and Image Compression Algorithms in Action. Kyiv: Triumph, 2013, 336 p. (In Russian)

11. Ablameiko S.V., Lagunovsky D.M. Image Processing: Technology, Methods, Application. Minsk: Amalthea, 2000. – 304 p. (In Russian)

12. Shirani J.S. JPEG compliant efficient progressive image coding / J.S. Shirani, F. Kossentini // Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – Seattle. – 1998. – P. 2633-2636. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.1998.678063>.

13. Miano J. Compressed Image File Formats: JPEG, PNG, GIF, XBM, BMP. Moscow: ACM, 1999. – 264 p. (In Russian)

14. Pratt W., Chen W.H., Welch L.R. Slant transform image coding. Proc. Computer Processing in communications. New York: Polytechnic Press, 1969. – 184 p.

15. Grundmann M., Kwatra V., Han M., Essa I. Efficient hierarchical graph-based video segmentation // 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – San Francisco. – 2010. – P. 2141-2148.

16. Gonzalez R., Woods K. Digital Image Processing. Kyiv: Tekhnosfera, 2018. – 1104 p. (In Russian)

17. Salomon D. Data Compression: The Complete Reference. Fourth Edition. London: Springer-Verlag Limited, 2007. – 899 p.

18. Stankiewicz O., Wegner K., Karwowski D., Stankowski J., Klimaszewski K. Encoding mode selection in HEVC with the use of noise reduction // International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP). – Poznan, 2017. – P. 1-6.

19. Christophe E., Lager D., Mailhes C. Quality criteria benchmark for hyperspectral imagery // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2005. – № 9(43). – P. 2103-2114.

20. Vatoлин D., Ratushnyak A., Smirnov M., Yukin V. Data Compression Methods. Archiver Device, Image and Video Compression. Moscow: DIALOG-MIFI, 2003. – 384 p. (In Russian)

Стеценко Оксана Николаевна, ассистент кафедры ПОВТАС, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

Хлопов Андрей Михайлович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры ПОВТАС, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

Акиншин Данил Иванович, студент кафедры ПОВТАС, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

Минченко Евгений Сергеевич, студент кафедры ПОВТАС, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

Oksana Nikolaevna Stetsenko, Assistant Professor of the Department of Technical Sciences, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

Khlopov Andrey Mikhailovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technical Sciences, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

Akinshin Danil Ivanovich, Student of the Department of POVTAS, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

Minchenko Evgeny Sergeevich, Student of the Department of Technical Sciences, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia