

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ**

УДК 621.391.25

*В. Ю. ЦВЕТКОВ***ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МНОГОРАКУРСНЫХ  
ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ КОМПЕНСАЦИИ ДВИЖЕНИЯ КАМЕРЫ***Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь,  
e-mail: vtsvet@bsuir.by*

Предложены геометрические модели формирования и прогнозирования многокурсовых изображений. На основе данных моделей для различных методов компенсации движения определены зависимости коэффициента сжатия от условий формирования многокурсовых изображений и траектории перемещения камеры. Разработаны алгоритмы кодирования многокурсовых изображений с адаптивным прогнозированием на основе компенсации движения с различной вычислительной сложностью. Произведена оценка эффективности кодеров многокурсовых изображений с адаптивным прогнозированием.

*Ключевые слова:* компенсация движения, прогнозирование изображений, многокурсовые изображения, кодирование изображений, модели изображений.

*V. Yu. TSVIATKOU***GEOMETRIC MODELS AND PREDICTION OF MULTI-ANGLE IMAGES  
BASED ON A CAMERA MOTION COMPENSATION***Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus,  
e-mail: vtsvet@bsuir.by*

Geometrical models of formation and prediction of multi-angle images are proposed. On the basis of these models for different methods of motion compensation the dependences of the compression ratio from the conditions of the forming of the multi-angle images and from the path of the camera moving are defined. Algorithms for coding of the multi-angle images with adaptive prediction based on motion compensation with different computational complexity are developed. An assessment of the effectiveness of multi-angle image encoders with adaptive prediction is produced.

*Keywords:* motion compensation, image prediction, multi-angle images, image encoding, image models.

**Введение.** В системах распределенного видеомониторинга, использующих множество камер, формируются и передаются многокурсовые изображения (МРИ). Для сокращения межракурсной избыточности сжатие МРИ должно использовать прогнозирование по некоторому однокурсному фрагменту (опорному изображению) некоторого множества приближений (прогнозных изображений) других однокурсных фрагментов (прогнозируемых изображений). В наиболее эффективных методах сжатия видеоданных прогнозирование основано на компенсации движения (КД) [1–4]. В [5] предложены геометрические модели формирования МРИ в двухмерном и трехмерном пространстве. На их основе разработаны геометрические модели прогнозирования МРИ. В этой связи актуальными задачами являются оценка эффективности использования различных методов компенсации движения для прогнозирования МРИ в разных условиях их формирования и разработка алгоритма адаптивной компенсации движения камеры, учитывающего эти условия.

**Геометрические модели пространств формирования многокурсовых изображений.** В зависимости от величины и характера смещения камеры от одного ракурса к другому трехмер-

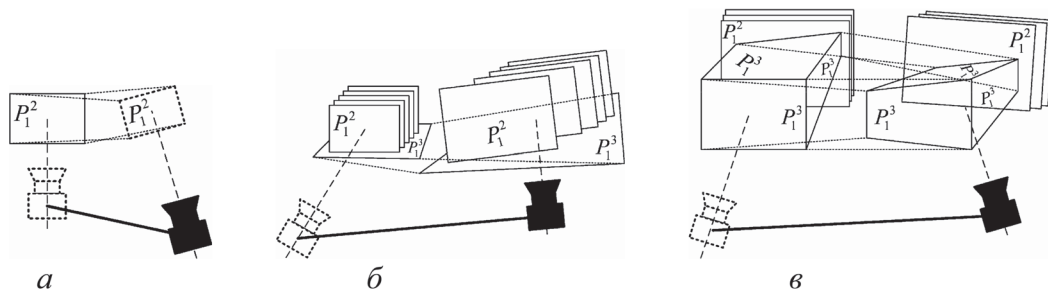


Рис. 1. Схемы геометрических пространств формирования многокурсных изображений  $P_1^2$  (а),  $P_{N/1}^{2/3}$  (б),  $P_{N/M}^{2/3}$  (в)

ное пространство  $P^3$  формирования МРИ может быть представлено приближенно одной или несколькими плоскостями в двумерном или трехмерном пространстве [5].

Наибольший практический интерес представляют следующие геометрические модели пространств формирования МРИ (рис. 1) [5]:

$P_1^2$  – плоскость в двумерном пространстве  $P^2$ , в которой лежат все объекты;

$P_N^2$  –  $N$  параллельных плоскостей  $P_1^2$ , каждая из которых расположена в двумерном пространстве  $P^2$  и включает в себя равноудаленные от камеры объекты;

$P_1^3$  – плоскость в трехмерном пространстве  $P^3$ , в которой лежат все объекты;

$P_M^3$  –  $M$  произвольно ориентированных плоскостей  $P_1^3$  в трехмерном пространстве  $P^3$ ;

$P_{N/1}^{2/3}$  ( $P_{1/1}^{2/3}$  в частном случае при  $N=1$ ) –  $N$  плоскостей  $P_1^2$  и плоскость  $P_1^3$ ;

$P_{N/M}^{2/3}$  ( $P_{1/M}^{2/3}$  в частном случае при  $N=1$ ) –  $N$  плоскостей  $P_1^2$  и  $M$  плоскостей  $P_1^3$ .

**Геометрические модели прогнозирования многокурсных изображений.** Общая геометрическая модель формирования МРИ  $\{I(r)\}_{(r=0, R-1)}$  показывает получение нескольких изображений с помощью перспективного проективного преобразования  $T_{PP}^3$ , согласно выражению

$$I(r) = T_{PP}^3(P^3, r), \quad (1)$$

где  $r$  – ракурс;  $R$  – число однокурсных фрагментов МРИ [5].

Выделяя среди этих изображений два (опорное  $I_B$  и прогнозируемое  $I$ ), можно построить модель прогнозирования изображения  $I$ .

Для нестационарной камеры актуальна проблема формирования прогнозного изображения  $I_P(r)$  на основе некоторого опорного изображения  $I_B(k)$ , полученного с другого ракурса  $k = r - \Delta r$ , в соответствии с выражением

$$I_P(r) = T_X^2(I_B(k), \Delta r), \quad (2)$$

где  $\Delta r$  – вектор перемещения камеры.

При известных значениях  $k$  и  $\Delta r$  данная проблема сводится к отысканию преобразования  $T_X^2$ . Если  $T_X^2$  известно, то для прогнозирования изображения  $I(r)$  достаточно иметь  $I_B(k)$  и  $\Delta r$ . Формирование прогнозного изображения  $I_P(r)$  в этом случае по известному вектору перемещения  $\Delta r$  камеры является процессом компенсации движения камеры.

При неизвестных  $k$  и  $\Delta r$  опорное  $I_B$  и прогнозное  $I_P$  изображения связаны с помощью следующего выражения:

$$I_P = T_X^2(I_B). \quad (3)$$

Следовательно, для прогнозирования изображения  $I$  необходимо иметь опорное изображение  $I_B$  и коэффициенты преобразования  $T_X^2$ . Преобразование  $T_X^2$  может быть получено в результате сопоставления опорного  $I_B$  и прогнозируемого  $I$  изображений.

Рассмотрим преобразование  $T_{PP}^3$  пространства формирования МРИ  $P^3$  в опорное изображение  $I_B$  и преобразование  $T_X^2$  опорного изображения  $I_B$  в прогнозное изображение  $I_P$ :

$P^3 \xrightarrow{T_{PP}^3} I_B \xrightarrow{T_X^2} I_P$ . Тип преобразования  $T_X^2$  зависит от модели пространства формирования МРИ  $P^3$ . В случае представления пространства формирования МРИ  $P^3$  моделью  $P_1^2$  ( $P^3 \rightarrow P_1^2$ ) или моделью  $P_N^2$  ( $P^3 \rightarrow P_N^2$ ) преобразование  $T_X^2$  является преобразованием  $T_S^2$  подобия, сохраняющим параллельность линий. При представлении пространства  $P^3$  моделью  $P_1^3$  или моделью  $P_M^3$  преобразование  $T_X^2$  является проективным преобразованием  $T_P^2$ , сохраняющим коллинеарность точек.

Рассмотренным геометрическим моделям формирования МРИ соответствуют следующие геометрические модели прогнозирования МРИ (рис. 2) [5]:  $P_1^2 \xrightarrow{T_{PP}^3} I_B \xrightarrow{T_S^2} I_P$ ;  $P_N^2 \xrightarrow{T_{PP}^3} I_B \xrightarrow{\{T_S^2\}_N} I_P$ ;

$P_{N/1}^{2/3} \xrightarrow{T_{PP}^3} I_B \xrightarrow{\{T_S^2\}_N, T_P^2} I_P$ ;  $P_{1/1}^{2/3} \xrightarrow{T_{PP}^3} I_B \xrightarrow{T_S^2, T_P^2} I_P$ ;  $P_{1/M}^{2/3} \xrightarrow{T_{PP}^3} I_B \xrightarrow{T_S^2, \{T_P^2\}_M} I_P$ ;

$P_{1/M}^{2/3} \xrightarrow{T_{PP}^3} I_B \xrightarrow{T_S^2, \{T_P^2\}_M} I_P$ ;  $P_M^3 \xrightarrow{T_{PP}^3} I_B \xrightarrow{\{T_P^2\}_M} I_P$ ;  $P_1^3 \xrightarrow{T_{PP}^3} I_B \xrightarrow{T_P^2} I_P$ .

**Сжатие многоракурсных изображений на основе компенсации движения камеры.** Полученное в результате прогнозирования изображение  $I_P$  используется для вычисления ошибки прогнозирования в результате пиксельной разности прогнозного  $I_P$  и прогнозируемого  $I$  изображений. Для восстановления МРИ декодеру требуются в общем случае опорное изображение  $I_B$ , ошибка прогнозирования и параметры преобразования опорного изображения или его фрагментов для каждого ракурса. Объем  $B_\Sigma$  кода прогнозирования складывается из объема  $B_E$  кода ошибки прогнозирования и объема  $B_{MC}$  кода параметров преобразования в соответствии с выражением

$$B_\Sigma = B_E + B_{MC}. \quad (4)$$

Сжатие МРИ достигается за счет уменьшения объемов  $B_E$  и  $B_{MC}$ , а также компактного представления опорного изображения  $I_B$ .

**Методы компенсации движения камеры.** Для прогнозирования МРИ представляют интерес следующие перемещения камеры: поперечное (в плоскости, перпендикулярной оптической

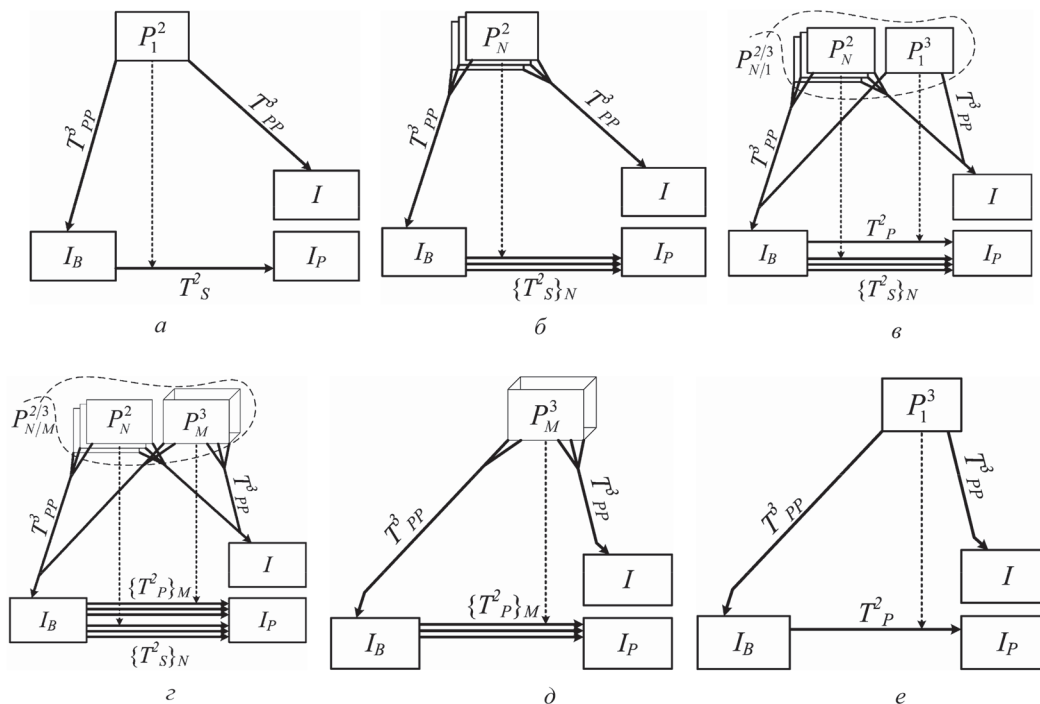


Рис. 2. Схемы прогнозирования многоракурсных изображений  $P_1^2 \xrightarrow{T_{PP}^3} I_B \xrightarrow{T_S^2} I_P$  (а),  $P_N^2 \xrightarrow{T_{PP}^3} I_B \xrightarrow{\{T_S^2\}_N} I_P$  (б),

$P_{N/1}^{2/3} \xrightarrow{T_{PP}^3} I_B \xrightarrow{\{T_S^2\}_N, T_P^2} I_P$  (в),  $P_{1/1}^{2/3} \xrightarrow{T_{PP}^3} I_B \xrightarrow{T_S^2, T_P^2} I_P$  (г),  $P_{1/M}^{2/3} \xrightarrow{T_{PP}^3} I_B \xrightarrow{T_S^2, \{T_P^2\}_M} I_P$  (д),  $P_M^3 \xrightarrow{T_{PP}^3} I_B \xrightarrow{\{T_P^2\}_M} I_P$  (е),  $P_1^3 \xrightarrow{T_{PP}^3} I_B \xrightarrow{T_P^2} I_P$  (е)

оси), продольное (в плоскости, перпендикулярной объектной плоскости и плоскости камеры), крен, поворот (тангаж), а также их комбинации. В зависимости от ориентации относительно объектной плоскости при перемещении камеры на одноракурсных фрагментах МРИ проявляются различные эффекты (в том числе в сочетании): сдвиг; масштабирование; поворот; перспективные искажения.

В стандартах сжатия MPEG-4, H.264, H.265 [3, 4] формирование прогнозного кадра осуществляется согласно выражению (3). Предполагается, что преобразование  $T_X^2$  является переносом  $T_T^2$  и его параметры определяются с помощью пиксельной (ПКД) и блочной (БКД) компенсаций движения. Перенос  $T_T^2$  не учитывает изменение масштаба, поворот и перспективные искажения базового изображения. Предполагается, что пространство формирования МРИ является плоскостью в двухмерном пространстве  $P^2$ , а смещение камеры незначительно. Это снижает эффективность использования ПКД и БКД для прогнозирования МРИ. Кроме того, в случае БКД разделение на блоки осуществляется без учета структуры изображения. Для повышения точности блочной сегментации используются блоки небольшого размера, что приводит к выделению значительного числа блоков на изображении и большому объему кода параметров преобразования, определяющих в случае БКД смещение блоков на опорном кадре относительно прогнозируемого кадра. ПКД обеспечивает сравнительно меньшую точность прогнозирования, поскольку все пиксели смещаются на одинаковую величину. Однако при ПКД формируется минимальный объем кода параметров преобразования. В случае поворота и поперечного смещения камеры при БКД объем кода параметров преобразования может быть сокращен за счет двухуровневого представления параметров преобразования (УБКД): глобального смещения для всех блоков и локального смещения для каждого блока.

Для прогнозирования многоракурсных изображений  $\{I(r)\}_{(r=0, R-1)}$  в [5] предложено применять методы проективной компенсации движения камеры, основанные на использовании проективного преобразования  $T_X^2$  опорного изображения  $I_B$ , полученного в некотором исходном ракурсе, для формирования прогнозного изображения  $I_P$ , соответствующего другому ракурсу. К проективной компенсации движения относятся кадровая (ККД), сегментная (СКД) и производные от сегментной двухуровневая сегментная (УСКД) и объектная (ОКД) компенсации движения. При ККД определяются коэффициенты проективного преобразования опорного изображения  $I_B$  в прогнозируемое изображение  $I$ . При СКД коэффициенты проективного преобразования определяются для каждого сегмента. При повороте и поперечном смещении камеры эффективна УСКД, использующая глобальные коэффициенты проективного преобразования для всех сегментов и локальные коэффициенты для каждого сегмента. При ОКД предполагается, что траектория перемещения камеры и расстояния до объектов, проецируемых на все сегменты кадра, известны или могут быть определены. В этом случае формирование прогнозного кадра осуществляется, согласно выражению (2), для которого определяется вектор перемещения камеры.

**Оценка эффективности методов компенсации движения** произведена на основе характеристик вычислительной сложности и объема  $B_\Sigma$  кода прогнозирования.

В порядке увеличения вычислительной сложности методы компенсации движения располагаются следующим образом: ПКД, БКД, УБКД, ККД, СКД, УСКД, ОКД.

Для оценки объема  $B_\Sigma$  кода прогнозирования для различных методов компенсации движения использованы тестовые высококонтрастные фрагменты изображения размером  $32 \times 32$  пикселя. Четвертую часть площади этих фрагментов составляют сегменты различного уровня яркости и размера (всего 7 сегментов – 5 сегментов площадью 1 пиксель, 1 сегмент площадью  $5 \times 5$  пикселей, 1 сегмент площадью  $13 \times 13$  пикселей), размещенные на однородном фоне и представляющие собой проекции объектов, расположенных на различном расстоянии от камеры.

Для разных методов компенсации движения с учетом размера фрагмента изображения ( $32 \times 32$  пикселя) объем  $B_{MC}$  кода параметров преобразования определен следующим образом. Для ПКД  $B_{MC} = 2 \times 5 = 10$  бит, исходя из того, что возможны смещения изображения по вертикали и горизонтали в пределах рассматриваемого фрагмента  $32 \times 32$  пикселя. Для БКД  $B_{MC} = 64 \times 6 = 384$  бита, исходя из размера блока  $4 \times 4$  пикселя, чисел блоков  $8 \times 8 = 64$  и  $3 + 3 = 6$  бит, необходимых

для кодирования смещений блоков по вертикали и горизонтали. Для ККД  $B_{MC} = 8 \times 5 = 40$  бит, исходя из количества коэффициентов матрицы плоской гомографии (8 коэффициентов) и числа бит на их кодирование (5 бит). Для СКД  $B_{MC} = 8 \times 8 \times 5 = 320$  бит, исходя из числа сегментов на фрагменте (8 сегментов, включая фон), количества коэффициентов матрицы плоской гомографии (8 коэффициентов) и числа бит на их кодирование (5 бит). Для УБКД  $B_{MC} = (2 + 2) + 64 \times (2 + 2) = 260$  бит, исходя из того, что на кодирование глобальных и локальных параметров выделяется по 2 бита. Для УСКД  $B_{MC} = 8 \times 3 + 8 \times 8 \times 3 = 216$  бит, исходя из того, что на кодирование глобальных и локальных параметров выделяется по 3 бита. Для ОКД  $B_{MC} = 6 \times 5 = 30$  бит, исходя из того, что для определения перемещения и ориентации камеры в трехмерном пространстве необходимо 6 параметров (угловые и линейные перемещения по трем координатам), для кодирования каждого из которых достаточно 5 бит.

Для оценки объема  $B_E$  кода ошибки прогнозирования для различных методов компенсации движения на основе тестовых фрагментов изображения с помощью перспективного проективного преобразования  $T_{PP}^3$ , согласно выражению (1), получены МРИ  $\{I(r)\}_{(r=0, R-1)}$  в условиях разных геометрических моделей пространства формирования МРИ и различных траекторий движения камеры. Согласно выражениям (2), (3), с помощью преобразования подобия  $T_S^2$  и проективного преобразования  $T_P^2$  сформированы прогнозные изображения. С использованием выражения

$$C_E = P_E / (YX) \quad (5)$$

определен коэффициент ошибок, где  $P_E$  – число пикселей с ошибками;  $Y, X$  – размер фрагмента изображения по вертикали и горизонтали. Для определения объема кода учитывается битовая глубина фрагмента изображений 6 бит (5 уровней яркости сегментов, включая фон, 4 уровня яркости на границах между сегментами и фоном, 10 уровней яркости на границах между другими 4 сегментами, столько же уровней яркости резервируется для новых сегментов, появляющихся при перемещении камеры). Тогда, исходя из коэффициента ошибок, размера фрагмента изображения ( $32 \times 32$  пикселя) и коэффициента сжатия ошибки (1,5 раза [6]), определяется объем  $B_E$  кода ошибки прогнозирования (в битах):

$$B_E = 6C_E YX / 1,5 = 4C_E YX. \quad (6)$$

На основе объемов  $B_E$  и  $B_{MC}$  с использованием выражения (2) для различных моделей пространств формирования МРИ и видов движения камеры определен объем  $B_\Sigma$  кода прогнозирования при различных траекториях перемещения камеры. В качестве примера на рис. 3 приведены зависимости объема  $B_\Sigma$  кода прогнозирования от величины  $S$  горизонтального смещения и растяжения нижней границы опорного изображения при поперечном и продольном перемещении камеры в пространстве  $P_1^3$ .

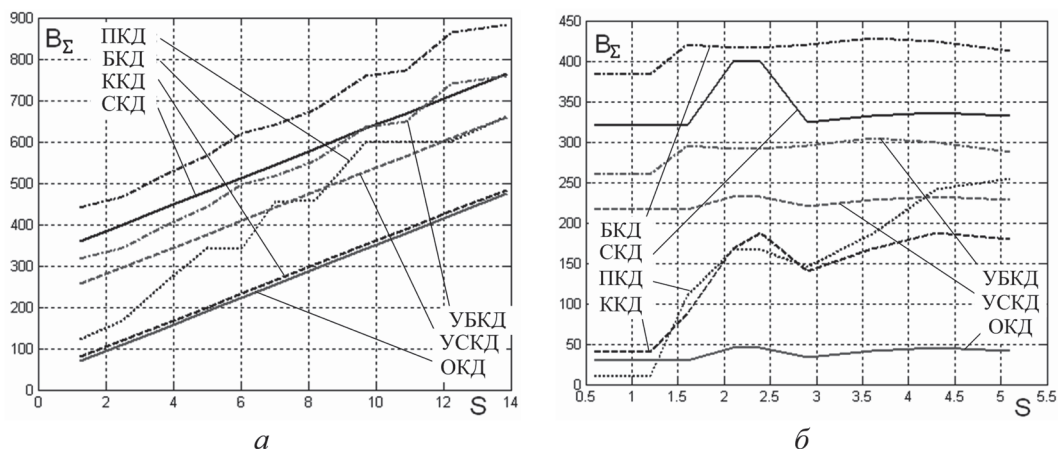


Рис. 3. Зависимости объема  $B_\Sigma$  кода прогнозирования от величины  $S$  горизонтального смещения и растяжения нижней границы опорного изображения при поперечном (а) и продольном (б) перемещениях камеры в пространстве  $P_1^3$

На основе полученных значений объема  $B_{\Sigma}$  кода прогнозирования произведено ранжирование методов компенсации движения (табл. 1). Максимальному рейтингу в табл. 1 соответствует минимальное значение объема  $B_{\Sigma}$  кода прогнозирования. Поперечное, продольное движения, крен, поворот (тангаж) обозначены буквами П, В, К, Т соответственно.

Из табл. 1 следует, что при усреднении по пространствам формирования МРИ максимальный рейтинг обеспечивает ОКД (6,6 балла), имеющая наибольшую вычислительную сложность. Экспериментально установлено, что при продольном перемещении камеры в пространстве  $P_1^3$  и растяжении нижней границы изображения более чем на пиксель, продольном перемещении камеры в других пространствах, а также при крене камеры более 2 град и поперечном ее перемещении во всех пространствах, кроме  $P_1^2$ , ОКД обеспечивает увеличение коэффициента сжатия до 5,9 раза по сравнению с ККД; до 7,2 раза по сравнению с УСКД; до 10,4 раза по сравнению с УБКД; до 10,7 раза по сравнению с СКД; до 14,5 раз по сравнению с БКД; до 20,9 раз по сравнению с ПКД. В остальных случаях, в том числе при повороте камеры для всех пространств формирования МРИ, ОКД обеспечивает меньший коэффициент сжатия по сравнению с ПКД.

Таблица 1. Рейтинг методов компенсации движения по объему кода прогнозирования

Метод компенсации движения	Средний рейтинг	Модель пространства формирования МРИ															
		$P_1^2$			$P_1^3$				$P_N^2$				$P_{1/1}^{2/3}$				
		П	В	К	П	В	К	Т	П	В	К	Т	П	В	К	Т	
ПКД	4,677	7	1-5	1-7	4-5	4-7	1-7	7	6	1-5	1-7	7	4-5	1-5	1-7	7	
БКД	1,339	1	1-2	1-2	1	1	1-2	1	1	1-2	1-2	1	1	1-2	1-2	1	
ККД	5,210	5	6	5-6	6	5-6	5-6	5	5	6	5-6	5	6	6	5-6	5	
СКД	2,516	2	2-3	2-3	2-3	2	2-3	2	2	2-3	2-3	2	2-3	2-3	2-3	2	
ОКД	6,597	6	7	6-7	7	6-7	6-7	6	7	7	6-7	6	7	7	6-7	6	
УСКД	4,516	4	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4	4	4-5	4-5	4	4-5	4-5	4-5	4	
УБКД	3,371	3	3-4	3-4	2-3	3	3-4	3	3	3-4	3-4	3	2-3	3-4	3-4	3	

Метод компенсации движения	Модель пространства формирования МРИ															
	$P_{N/1}^{2/3}$				$P_M^3$				$P_{1/M}^{2/3}$				$P_{N/M}^{2/3}$			
	П	В	К	Т	П	В	К	Т	П	В	К	Т	П	В	К	Т
ПКД	2-5	1-5	1-7	7	2-6	1-5	1-7	7	2-6	1-5	1-7	7	2-6	1-5	1-7	7
БКД	1	1-2	1-2	1	1-3	1-2	1-2	1	1-3	1-2	1-2	1	1-3	1-2	1-2	1
ККД	6	5-6	5-6	5	1-5	4-5	5-6	5	1-5	4-5	5-6	5	1-5	4-5	5-6	5
СКД	2-3	2-3	2-3	2	2-5	3-4	2-3	2	2-5	3-4	2-3	2	2-5	3-4	2-3	2
ОКД	7	7	6-7	6	7	7	6-7	6	7	7	6-7	6	7	7	6-7	6
УСКД	4-5	4-6	4-5	4	4-6	5-6	4-5	4	4-6	5-6	4-5	4	4-6	5-6	4-5	4
УБКД	3-4	3-4	3-4	3	3-5	3-5	3-4	3	3-5	3-5	3-4	3	3-5	3-5	3-4	3

Следующая по рейтингу – ККД (5,2 балла), имеющая среднюю вычислительную сложность. Ее недостатком является ухудшение характеристик сжатия при больших продольных и поперечных перемещениях камеры в пространствах формирования МРИ  $P_M^3$ ,  $P_{1/M}^{2/3}$ ,  $P_{N/M}^{2/3}$ . Установлено, что при продольном перемещении камеры в пространствах  $P_1^2$ ,  $P_N^2$  и  $P_{1/1}^{2/3}$ , при поперечном перемещении камеры в пространствах  $P_1^3$ ,  $P_{1/1}^{2/3}$  и  $P_{N/1}^{2/3}$ , крене камеры более 2 град во всех пространствах формирования МРИ ККД уступает только ОКД, обеспечивая при этом увеличение коэффициента сжатия до 15,7 раза по сравнению с ПКД. При поперечном перемещении камеры в пространствах  $P_1^2$  и  $P_N^2$ , повороте и крене камеры менее 2 град во всех пространствах формирования МРИ ККД уступает ОКД и ПКД, обеспечивая увеличение коэффициента сжатия до 9,6 раза по сравнению с БКД.

Далее по рейтингу следует ПКД (4,7 балла), имеющая минимальную вычислительную сложность. При этом ПКД лишь незначительно уступает, а иногда и превосходит по эффективности ОКД при малых смещениях камеры для некоторых моделей пространств формирования МРИ.

Установлено, что при поперечном перемещении камеры для модели  $P_1^2$ , повороте и крене камеры до 2 град во всех пространствах формирования МРИ, продольном перемещении камеры в пространстве  $P_1^3$  и растяжении нижней границы изображения до 1,3 пикселя ПКД превосходит другие методы компенсации движения, включая ОКД, и обеспечивает увеличение коэффициента сжатия до 38,4 раза по сравнению с БКД.

Следующая по рейтингу – УСКД (4,5 балла), имеющая среднюю вычислительную сложность. Рейтинг УСКД почти в 2 раза выше рейтинга СКД, имеющей практически такую же вычислительную сложность. Установлено, что при поперечном перемещении камеры в пространствах  $P_M^3$ ,  $P_{1/M}^{2/3}$ ,  $P_{N/M}^{2/3}$  и смещении изображения более чем на три пикселя УСКД уступает только ОКД, обеспечивая увеличение коэффициента сжатия до 2,7 раза по сравнению с ПКД и до 2,3 раза по сравнению с БКД.

Далее по рейтингу следуют УБКД (3,4 балла), СКД (2,5 балла) и БКД (1,3 балла). Характеристики УБКД и БКД достаточно стабильны как при малых, так и при больших смещениях камеры, если область поиска схожих блоков на опорном изображении не ограничена. С учетом относительно невысокой вычислительной сложности УБКД может быть эффективна при больших смещениях камеры в случае отсутствия ограничений на размер области поиска соответствия, когда ПКД приводит к значительной ошибке прогнозирования.

**Адаптивная компенсация движения.** Оценка эффективности показала существенную зависимость коэффициента сжатия МРИ от вычислительной сложности методов компенсации движения, пространства формирования МРИ и траектории движения камеры. Поэтому актуальной является задача разработки алгоритма и схем кодирования МРИ с адаптивным прогнозированием с различной вычислительной сложностью: низкой (на основе ПКД и БКД), средней (на основе ПКД, УБКД, ККД, СКД) и высокой (на основе ПКД, УБКД, ККД, УСКД, ОКД).

Алгоритм кодирования МРИ с адаптивным прогнозированием состоит из следующих шагов.

1. Выбор модели пространства формирования МРИ. Определяется значение идентификатора  $S_{MRI}$  модели пространства формирования МРИ с помощью табл. 2.

Таблица 2. Значения идентификатора  $S_{MRI}$

Модель пространства формирования МРИ	$P_1^2$	$P_1^3$	$P_N^2$	$P_{1/1}^{2/3}$	$P_{N/1}^{2/3}$	$P_M^3$	$P_{1/M}^{2/3}$	$P_{N/M}^{2/3}$
$S_{MRI}$	1	2	3	4	5	6	7	8

2. Определение траектории движения камеры. Для этого могут использоваться данные телеметрии носителя, на котором установлена камера. Определяется значение идентификатора  $S_{CM}$  движения камеры с помощью табл. 3. При этом учитывается возможное комбинированное перемещение камеры (например, продольное с креном или поперечное, продольное с поворотом и т.д.).

Таблица 3. Значения идентификатора  $S_{CM}$

Траектория перемещения камеры	Идентификатор $S_{CM}$														
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15
Поперечная	X	–	X	–	X	–	X	–	X	–	X	–	X	–	X
Продольная	–	X	X	–	–	X	X	–	–	X	X	–	–	X	X
Поворот	–	–	–	X	X	X	X	–	–	–	–	X	X	X	X
Крен	–	–	–	–	–	–	–	X	X	X	X	X	X	X	X

3. Выбор метода компенсации движения.

4. Компенсация движения. На основе опорного  $I_B$  и прогнозируемого  $I$  изображений формируется прогнозируемое изображение  $I_P$  и определяются параметры преобразования  $T_X^2$ .

5. Вычисление ошибки прогнозирования.

6. Кодирование ошибки прогнозирования, обеспечивающее сжатие за счет устранения избыточности и эффективного кодирования. Формируется код ошибки прогнозирования, объем которого оценивается значением  $B_E$ .

7. Кодирование параметров преобразования. Формируется код параметров преобразования, объем которого оценивается значением  $V_{MC}$ .

8. Мультиплексирование кодов ошибки прогнозирования и параметров преобразования. Формируется результирующий код компактного представления прогнозного изображения, объем которого оценивается значением  $V_{\Sigma}$ .

Выбор метода компенсации движения для кодирования МРИ осуществляется на основе рейтингов и зависимостей объема кода ошибки прогнозирования и параметров преобразования от траектории перемещения камеры. Выбор методов компенсации движения средней вычислительной сложности в зависимости от условий определяет табл. 4. В ней использованы следующие обозначения: П для ПКД; К для ККД; Б для УБКД; С для СКД.

Таблица 4. Выбор методов компенсации движения средней вычислительной сложности

$S_{CM}$	Траектория перемещения камеры				Пространство формирования МРИ ( $S_{MRI}$ )								
	Поперечная	Продольная	Поворот	Крен	$P_1^2$	$P_1^3$	$P_N^2$	$P_{N/l}^{2/3}$	$P_{N/l}^{2/3}$	$P_M^3$	$P_{l/M}^{2/3}$	$P_{N/M}^{2/3}$	
01				Х	П/К <sup>1</sup>	П/К <sup>1</sup>	П/К <sup>1</sup>	П/К <sup>1</sup>	П/К <sup>1</sup>	П/К <sup>1</sup>	П/К <sup>1</sup>	П/К <sup>1</sup>	
02			Х		–	П	П	П	П	П	П	П	
03			Х	Х	–	П/К <sup>1</sup>	П/К <sup>1</sup>	П/К <sup>1</sup>	П/К <sup>1</sup>	П/К <sup>1</sup>	П/К <sup>1</sup>	П/К <sup>1</sup>	
04		Х			К	П/К <sup>2</sup>	К	К	К	П/Б/К <sup>4</sup>	П/Б/К <sup>4</sup>	П/Б/К <sup>4</sup>	
05		Х		Х	К	П/К <sup>3</sup>	К	К	К	П/Б/К <sup>5</sup>	П/Б/К <sup>5</sup>	П/Б/К <sup>5</sup>	
06		Х	Х		–	П/К <sup>2</sup>	К	К	К	П/Б/К <sup>4</sup>	П/Б/К <sup>4</sup>	П/Б/К <sup>4</sup>	
07		Х	Х	Х	–	П/К <sup>2</sup>	К	К	К	П/Б/К <sup>5</sup>	П/Б/К <sup>5</sup>	П/Б/К <sup>5</sup>	
08	Х				П	К	П	К	К	П/Б/К/С <sup>6</sup>	П/Б/К/С <sup>6</sup>	П/Б/К/С <sup>6</sup>	
09	Х			Х	П/К <sup>1</sup>	К	П/К <sup>1</sup>	К	К	П/Б/К/С <sup>7</sup>	П/Б/К/С <sup>7</sup>	П/Б/К/С <sup>7</sup>	
10	Х		Х		–	К	П	К	К	П/Б/К/С <sup>6</sup>	П/Б/К/С <sup>6</sup>	П/Б/К/С <sup>6</sup>	
11	Х		Х	Х	–	К	П	К	К	П/Б/К/С <sup>7</sup>	П/Б/К/С <sup>7</sup>	П/Б/К/С <sup>7</sup>	
12	Х	Х			К	К	К	К	К	П/Б/К/С <sup>8</sup>	П/Б/К/С <sup>8</sup>	П/Б/К/С <sup>8</sup>	
13	Х	Х		Х	К	К	К	К	К	П/Б/К/С <sup>9</sup>	П/Б/К/С <sup>9</sup>	П/Б/К/С <sup>9</sup>	
14	Х	Х	Х		–	К	К	К	К	П/Б/К/С <sup>8</sup>	П/Б/К/С <sup>8</sup>	П/Б/К/С <sup>8</sup>	
15	Х	Х	Х	Х	–	К	К	К	К	П/Б/К/С <sup>9</sup>	П/Б/К/С <sup>9</sup>	П/Б/К/С <sup>9</sup>	

<sup>1</sup> При крене до 2 град – ПКД.

<sup>2</sup> ПКД при растяжении границы изображения до 3 пикселей.

<sup>3</sup> При крене до 2 град – ПКД, при крене более 2 град – ПКД при растяжении границы изображения до 4 пикселей.

<sup>4</sup> ПКД при растяжении границы изображения до 3 пикселей, УБКД при растяжении границы изображения от 3 до 5,5 пикселей, ККД при растяжении границы изображения от 5,5 пикселей.

<sup>5</sup> ПКД при растяжении границы изображения до 3,5 пикселей и крене до 2 град, при растяжении границы изображения от 3,5 пикселей или крене более 2 град (см. п. 4).

<sup>6</sup> ПКД при смещении изображения до 4 пикселей, ККД при смещении изображения от 4 до 6 пикселей, УБКД при смещении изображения от 6 до 7 пикселей, СКД при смещении изображения от 7 пикселей.

<sup>7</sup> ПКД при смещении изображения до 5 пикселей и крене до 2 град, при смещении изображения более 5 пикселей или крене более 2 град (см. п. 6).

<sup>8</sup> ПКД при растяжении границы изображения до 3 пикселей и при смещении изображения до 5 пикселей, УБКД при растяжении границы изображения от 3 до 5,5 пикселей и смещении изображения от 4 пикселей, ККД при растяжении границы изображения от 5,5 пикселей и смещении изображения до 7 пикселей.

<sup>9</sup> ПКД при растяжении границы изображения до 3 пикселей, смещении изображения до 5 пикселей и крене до 2 град, при крене камеры более чем на 2 град (см. п. 8).

На рис. 4 приведены схемы кодеров МРИ с адаптивным прогнозированием на основе компенсации движения со средней вычислительной сложностью. Экспериментально установлено, что адаптивный кодер на основе ПКД и БКД (имеющий низкую вычислительную сложность) обеспечивает увеличение коэффициента сжатия до 2,8 раза по сравнению с кодером на основе ПКД и до 38,4 раза по сравнению с кодером на основе БКД. Адаптивный кодер на основе ПКД, УБКД, СКД и ККД (имеющий среднюю вычислительную сложность) обеспечивает увеличе-



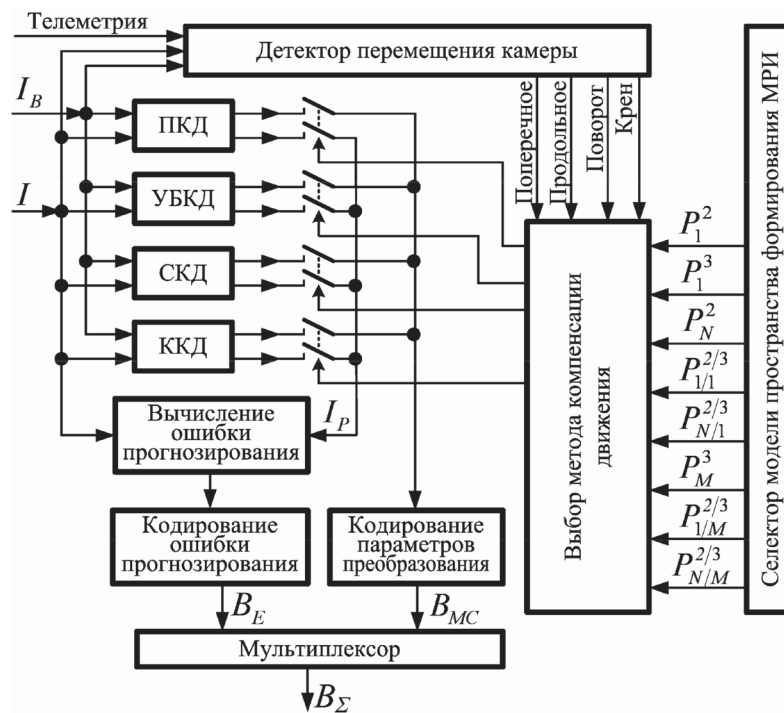


Рис. 4. Кодер МРИ с адаптивным прогнозированием на основе компенсации движения со средней вычислительной сложностью

ние коэффициента сжатия до 5,7 раза по сравнению с кодером на основе ПКД, до 21,6 раза по сравнению с кодером на основе УБКД, до 32,0 раза по сравнению с кодером на основе СКД, до 4,0 раза по сравнению с кодером на основе ККД. Адаптивный кодер на основе ПКД и ОКД (имеющий высокую вычислительную сложность) обеспечивает увеличение коэффициента сжатия до 5,9 раза по сравнению с кодером на основе ККД; до 7,2 раза по сравнению с кодером на основе УСКД; до 10,4 раза по сравнению с кодером на основе УБКД; до 20,9 раза по сравнению с ПКД; до 3,0 раза по сравнению с кодером на основе ОКД.

**Заключение.** Разработаны геометрические модели формирования и прогнозирования многоактурных изображений. Они позволили определить зависимости коэффициента сжатия от условий формирования многоактурных изображений и траектории перемещения камеры для различных методов компенсации движения и разработать алгоритмы и схемы кодирования многоактурных изображений с адаптивным прогнозированием на основе компенсации движения с различной вычислительной сложностью. Произведена оценка эффективности кодеров многоактурных изображений с адаптивным прогнозированием.

### Список использованной литературы

1. Wallace, G. K. The JPEG still picture compression standard / G. K. Wallace // Communications of the ACM. – 1991. – Vol. 34, N 4. – P. 30–44.
2. Yu, W. Advantages of Motion JPEG2000 in Video Processing / W. Yu, R. Qiu, J. Fritts // Proc. SPIE, Visual Communications and Image Processing. – 2002. – Vol. 4671. – P. 635–645.
3. Iain, R. H.264 and MPEG-4 Video Compression and Video Coding for Next-generation Multimedia / R. Iain. – The Robert Gordon University, Aberdeen, UK, John Wiley & Sons Ltd., 2003. – 281 p.
4. Sullivan, G. J. Overview of the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard / G. J. Sullivan [et al.] // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2012. – Vol. 22. – N 12. – P. 1649–1668.
5. Цветков, В. Ю. Геометрические модели многоактурных изображений и проективная компенсация движения камеры / В. Ю. Цветков // Докл. Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2014. – № 8 (86). – С. 41–47.
6. Борискевич, А. А. Метод масштабируемого вложенного кодирования изображений на основе иерархической кластеризации вейвлет-структур / А. А. Борискевич, В. Ю. Цветков // Докл. НАН Беларуси. – 2009. – Т. 53, № 3. – С. 38–48.

Поступила в редакцию 19.06.2015