

УДК 004.627

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-74-81

БЫСТРЫЙ АЛГОРИТМ ВНУТРИКАДРОВОГО КОДИРОВАНИЯ ДЛЯ HEVC НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТИ ВЫБОРА РЕЖИМА

Доан Тиен Бан, А.А. Тропченко

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
Адрес для переписки: zayka_98rus@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 24.10.19, принята к печати 21.11.19
Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Доан Тиен Бан, Тропченко А.А. Быстрый алгоритм внутрикадрового кодирования для HEVC на основе вероятности выбора режима // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 1. № 1. С. 74–81. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-74-81

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрен процесс внутрикадрового кодирования в стандарте высокоэффективного кодирования видеоизображений. Проведен анализ вероятности выбора режимов, предложен алгоритм быстрого выбора режима предсказания. **Метод.** Из 35 возможных режимов стандартного алгоритма «по умолчанию» предлагается выбирать набор из 11 режимов с наибольшей вероятностью выбора в качестве входных данных для дальнейшего уточненного выбора. В зависимости от полученных результатов добавляется еще один этап, где уменьшается выбор до четырех режимов. Выбранные режимы используются в двухэтапном процессе оптимизации, в результате чего выбирается наилучший режим для текущего блока кодирования. **Основные результаты.** Предложенный алгоритм реализован в среде разработки C++. Для тестирования использован ряд стандартных видеопоследовательностей с четырьмя значениями параметра квантования (Quantization Parameter). Результаты проведенных экспериментов показали, что предложенный быстрый алгоритм сокращает время кодирования на 17,03 % по сравнению с эталонным программным обеспечением HM-16.20, с увеличением скорости передачи на 1,26 % и потерей качества всего на 0,033 дБ. **Практическая значимость.** Предложенный быстрый алгоритм обеспечивает снижение вычислительных затрат при крайне незначительной потере качества восстанавливаемой видеопоследовательности. Он может быть использован в виде стандартного блока видеокodeка стандарта H.265 для замены существующего блока внутрикадрового предсказания в эталонной программе, чтобы ускорить процесс сжатия видео.

Ключевые слова

H.265/HEVC, сжатие видеоданных, внутрикадровое предсказание, оптимизация скорости искажения, быстрый алгоритм

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-74-81

FAST IN-FRAME CODING ALGORITHM FOR HEVC BASED ON PROBABILITY OF MODE SELECTION

Doan Tien Ban, A.A. Tropchenko

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
Corresponding author: zayka_98rus@mail.ru

Article info

Received 24.10.19, accepted 21.11.19
Article in Russian

For citation: Doan Tien Ban, Tropchenko A.A. Fast in-frame coding algorithm for HEVC based on probability of mode selection. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 74–81 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-74-81

Abstract

Subject of Research. The in-frame encoding process in the standard of high-efficiency encoding of video images is considered. The analysis of mode selection probability is carried out; the algorithm of fast prediction mode selection is proposed. **Method.** It is proposed to select a set of 11 modes with the highest probability of selection of the 35 possible modes of the standard “default” algorithm, as input data for further refined selection. Depending on the results obtained, another stage is added, where the choice is reduced up to 4 modes. The selected modes are used in a two-step

optimization process, which selects the best mode for the current encoding block. **Main Results.** The proposed algorithm is implemented in the C++ development environment. A number of standard video sequences with four quantization parameter values is used for testing. The results of the carried out experiments show that the proposed fast algorithm reduces the encoding time by 17.03 % compared to HM-16.20 reference software, with an increase in transmission speed by 1.26 % and a loss of quality only by 0.033 dB. **Practical Relevance.** The proposed fast algorithm provides a reduction in computational costs with an extremely negligible loss of quality of the restored video sequence. It can be used as a standard H265 video codec block for replacement of the existing in-frame prediction block in the reference program to speed up the video compression process.

Keywords

H.265/HEVC, video compression, in-frame prediction, rate distortion optimization, fast algorithm

Введение

Стандарт высокоэффективного кодирования видеозображений H.265 или HEVC (High Efficiency Video Coding) значительно повышает эффективность видеокодирования по сравнению со стандартом H.264/AVC (Advanced Video Coding) благодаря множеству новых инструментов, таких как рекурсивная древовидная структура блоков кодирования, улучшение внутрикадрового и межкадрового предсказаний, преобразование блока с большими размерами и т. д. [1].

Вместо использования макроблоков 16×16 , как в предшествующем стандарте H.264 [2], HEVC поддерживает больший диапазон размеров блоков кодирования [3]. Для эффективного и гибкого представления видео различных разрешений в HEVC используются четыре абстракции: блок кодирования дерева (CTU, Coding Tree Unit), блок кодирования (CU, Coding Unit), блок предсказания (PU, Prediction Unit) и блок преобразования (TU, Transform Unit). Блок кодирования аналогичен макроблокам, используемым в H.264/AVC, и является базовым блоком, включающим в себя блок предсказания и блок преобразования. Размер CU может варьироваться от 64×64 до 8×8 пикселей, что соответствует четырем значениям параметра глубины от 0 до 3. CTU является самым большим блоком кодирования и может быть разделен на четыре подблока кодирования размером 32×32 с использованием разбиения четырех деревьев, и эти подблоки могут быть в дальнейшем дополнительно разделены на меньшие блоки, пока они не достигнут размера 8×8 . Оптимальный размер CU определяется после вычисления величины искажения (RD, Rate-Distortion) для всех уровней глубины. Каждый CU содержит от одного до четырех блоков предсказания, размер которых ограничен размером CU. PU является основным компонентом прогнозирования и используется при кодировании информации, связан-

ной с предсказанием (например, векторов движения и режимов предсказания) [3]. На рис. 1 приведен пример разделения CTU в HEVC.

Внутрикадровое кодирование в HEVC [4] можно рассматривать как расширение H.264/AVC, поскольку оба стандарта основаны на предсказании пространственных сэмплов, за которым следует кодирование преобразованием. Для увеличения эффективности устранения пространственной избыточности добавлены дополнительные направления внутрикадрового предсказания, позволяющие получить более точные структуры предсказания. Это ведет к снижению уровня потерь энергии остаточного сигнала и, следовательно, повышенной эффективности кодирования. HEVC содержит 35 режимов внутрикадрового предсказания, среди которых схожие с H.264 режимы PLANAR и DC, а также 33 угловых режима, как показано на рис. 2, а.

Однако сложность процесса оптимизации скорости искажения (RDO, Rate-Distortion Optimization) значительно возрастает по мере увеличения количества режимов предсказания. Чтобы уменьшить вычислительную нагрузку на кодер, эталонное программное обеспечение тестовой модели HM (HEVC Test Model) использует метод быстрого выбора режима для ускорения процесса внутреннего кодирования [5, 6], который показан на рис. 2, б. Сначала вместо дискретного косинусного преобразования (DCT) для проверки всех 35 режимов используется преобразование Адамара, которое имеет относительно низкую вычислительную сложность. Затем выбираются N лучших режимов на основе минимальной стоимости JSATD:

$$J_{SATD} = SATD + \lambda B_{pred}$$

где λ — множитель Лагранжа; B_{pred} — число битов для кодирования режима предсказания; SATD (Sum of Absolute Transformed Differences) представляет собой

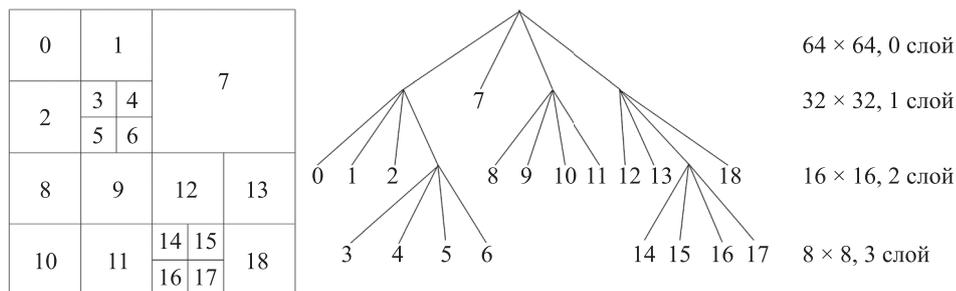


Рис. 1. Пример разделения блока кодирования дерева в HEVC

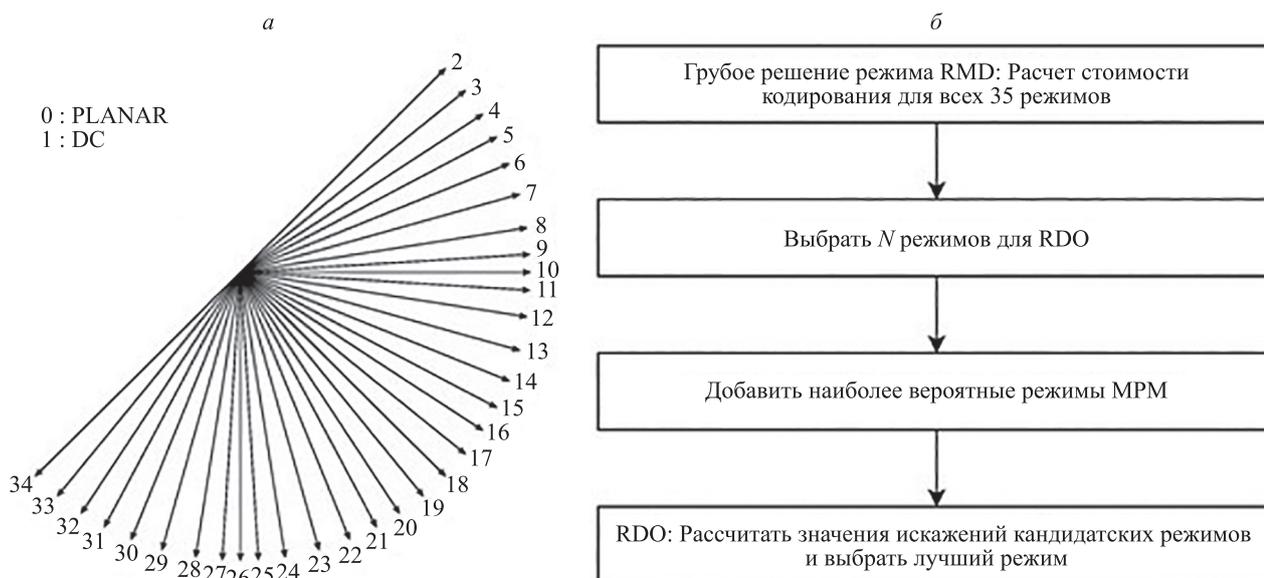


Рис. 2. Режимы внутрикадрового предсказания в HEVC (а); процесс внутрикадрового предсказания в HM (б)

сумму абсолютных разностей преобразования между исходными и предсказуемыми пикселями:

$$Diff(x, y) = Orig(x, y) - Pred(x, y),$$

$$SATD = \sum_{x,y} |Diff(x, y)|.$$

Значение N заранее задано для каждого размера PU и установлено равным $\{8, 8, 3, 3, 3\}$ для блоков 4×4 , 8×8 , 16×16 , 32×32 и 64×64 пикселей соответственно.

После этого кодер генерирует список наиболее вероятных режимов MPM (Most Probable Modes), содержащий три режима на основе наилучшего режима из уже закодированных соседних блоков предсказания, и MPM будет добавлен в набор N кандидатов, если они еще не включены. Значения JRDO используются для выбора окончательного режима и рассчитываются следующим образом:

$$J_{RDO} = SSE + \lambda R_{total}$$

где SSE (Sum of Squared Errors) — сумма квадратов ошибок между исходными и восстановленными пикселями; R_{total} — общее количество битов, используемых для кодирования режима, может отражать общую производительность режима, синтетически учитывая, как потеря качества и скорость передачи битов влияют на эффективность кодирования. Сравнивая все возможные рассчитанные значения, выбирается режим с наименьшим J_{RDO} в качестве наилучшего режима предсказания для текущего CU.

С помощью данного метода количество проверяемых режимов в процессе оптимизации скорости искажения уменьшено с 35 до 3~11, что может снизить вычислительные затраты. Но сложность алгоритма остается все еще достаточно высокой, поскольку процесс RMD должен пройти все 35 внутренних режимов, и этот процесс внутреннего предсказания должен быть выполнен на всей возможной глубине блока кодирования.

В последнее время было проведено много исследований по снижению вычислительных затрат на внутрикадровое кодирование HEVC [7–18]. Большинство быстрых алгоритмов базируется на оптимизации процесса разделения блока кодирования и ускорении процесса принятия решений режима, при этом ряд алгоритмов сочетают оба подхода для разработки гибридного алгоритма. На основе определения вероятности выбора режимов предлагается быстрый алгоритм, который предлагается ниже.

Анализ вероятности выбора режимов

В HEVC используется 35 внутренних режимов, и при внутрикадровом предсказании кодер должен пройти все 35 режимов на всей возможной глубине CU. Теоретически эти режимы играют одинаковую роль и равновероятны. В предлагаемом алгоритме предварительно анализируются некоторые тестовые видеопоследовательности разных типов. На рис. 3 приведены диаграммы, отражающие вероятность (P) выбора конкретных режимов предсказания при сжатии тестовых видеопоследовательностей.

Статистические данные показывают, что наиболее вероятными для всех видеопоследовательностей являются режимы предсказания PLANAR и DC. Однако вероятностный подход может быть таким же оптимальным для вертикального и горизонтального режимов (ANGULAR10 и ANGULAR26), чем для остальных угловых режимов. Тем самым следует в первую очередь рассматривать именно эти два режима при выборе оптимального внутрикадрового режима.

Предлагаемый быстрый алгоритм для внутрикадрового кодирования

Из анализа тестовых видеопоследовательностей можно отметить, что на практике наилучший режим всегда соответствует режиму с наименьшей стоимо-

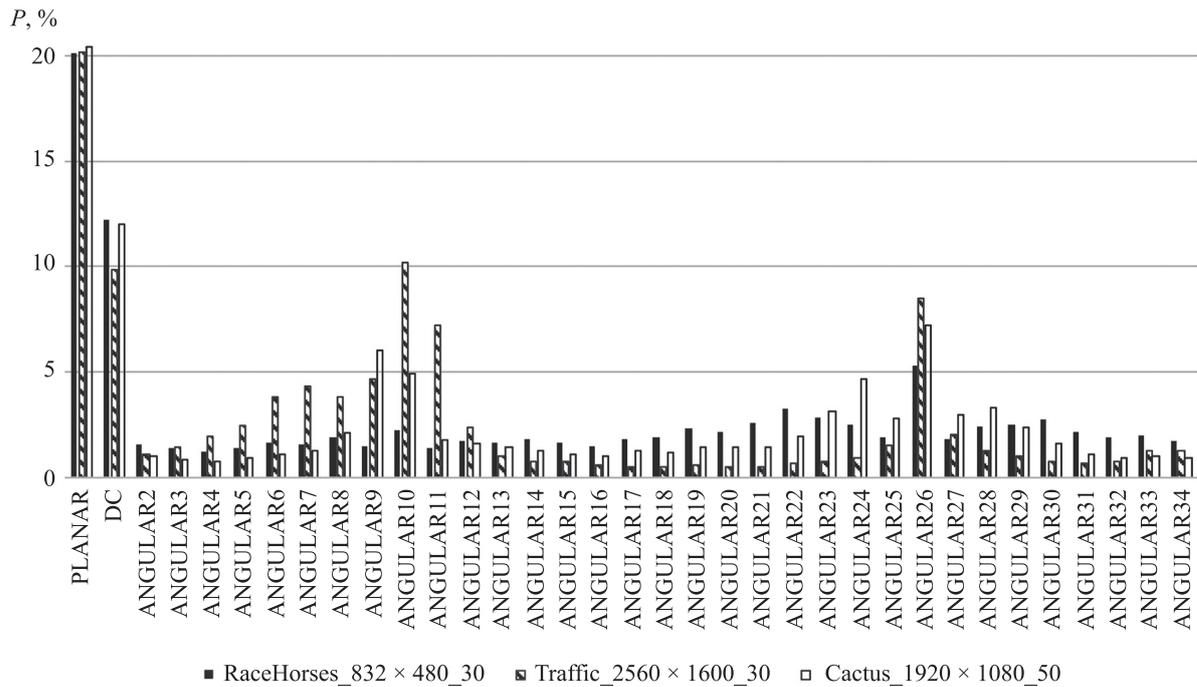


Рис. 3. Вероятность выбора режима предсказания в тестовых видеопоследовательностях

стью кодирования в списке кандидатов направлений из всех возможных, полученном после процесса расчета стоимости кодирования J_{SATD} . В сочетании со статистикой вероятности выбора режимов предлагается новый алгоритм для уменьшения вычислительной сложности. Вместо использования единого шага при расчете J_{SATD} по всем 35 направлениям, выбирается гибкий шаг (RMD2). Входные данные для RMD2 зависят от результатов расчета RMD, при этом количество режимов, проверяемых по RMD, уменьшается с 35 до 11. Выбор режима предсказания предлагается осуществлять следующим образом.

1. Из 35 режимов создается новый набор, включающий DC, PLANAR и угловые режимы ANGULAR ($2 + 4i$), где $0 \leq i \leq 8$. Эти 11 режимов будут протестированы с использованием процесса RMD, чтобы найти режим с наименьшим J_{SATD} . Выбирается лучший и второй после него режимы FM (First Mode) и SM (Second Mode) соответственно.

2. Для PU 16×16 , 32×32 и 64×64 : выполняется проверка, если FM не является PLANAR, DC или вертикальным режимом (0, 1, 26), то выполняется второй шаг расчета RMD2 для четырех соседних режимов FM: FM-2, FM-1, FM+1, FM+2; после чего обновляется список кандидатов. В противоположном случае пропускается шаг расчета RMD2.

3. Для PU 8×8 и 4×4 : если FM и SM являются режимами PLANAR или DC, кодер добавляет режимы MPM (если такие еще не включены в списке кандидатов) и выполняет шаг расчета стоимости RD. В противном случае второй шаг RMD2 проверяет некоторые другие режимы FM-2, FM-1, FM+1, FM+2 (если FM является угловым режимом) или SM-2, SM-1, SM+1, SM+2 (если FM является DC или PLANAR). В обновленный список кандидатов тем самым добавляются режимы MPM для расчета стоимости RD.

Особенности предлагаемого алгоритма показаны на рис. 4.

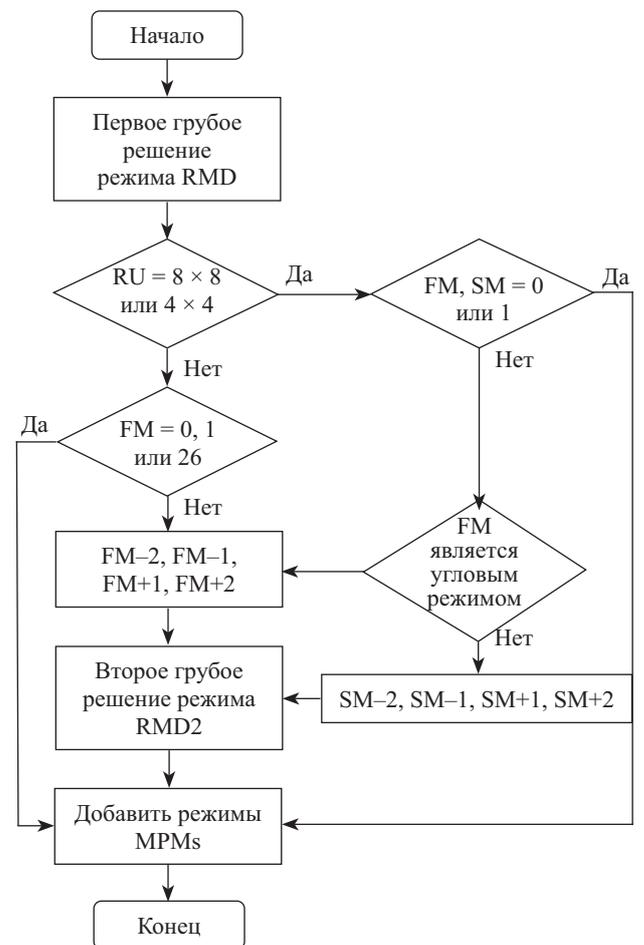


Рис. 4. Блок-схема предлагаемого алгоритма

Таким образом, вместо 35 направлений, согласно предлагаемому алгоритму, минимальное и максимальное количество проверенных направлений составляет от 11 до 15 соответственно, что значительно уменьшает вычислительные затраты.

Экспериментальные результаты

Предложенный в предыдущем разделе алгоритм был реализован в среде разработки C++ на платформе macOS 10.14.5 с процессором Intel (R) Core i5-5257U @ 2,7 ГГц и 8 ГБ оперативной памяти. Для тестирования был использован ряд стандартных видеопоследовательностей с конфигурацией All Intra-Main и четырьмя значениями параметра квантования QP (Quantization Parameter): 22, 27, 32, 37.

Для оценки эффективности алгоритма были произведены сравнения с HM-16.20 по качеству сжатия PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio), скорости передачи и времени кодирования.

$$\Delta PSNR = PSNR_{HM-16.20} - PSNR_{предл.},$$

$$\Delta \text{Битрейт} = \frac{\text{Битрейт}_{HM-16.20} - \text{Битрейт}_{предл.}}{\text{Битрейт}_{HM-16.20}},$$

$$\Delta T = \frac{T_{HM-16.20} - T_{предл.}}{T_{HM-16.20}},$$

где $\Delta PSNR$, $\Delta \text{Битрейт}$ и ΔT — уменьшение PSNR, уменьшение скорости передачи и сокращение времени кодирования соответственно; HM-16.20 и предл. — значения для эталонного программного обеспечения HM-16.20 и предложенного алгоритма.

Табл. 1 показывает, что потеря в качестве для предложенного алгоритма составляет 0,033 дБ по сравнению с HM-16.20, однако при этом скорость передачи (битрейт) увеличивается на 1,26 %.

Как правило, для различных последовательностей получаются различные результаты, что связано с тем, что кадры видеопоследовательностей имеют разную детализацию и сложность. Экспериментальные результаты показывают, что для последовательности Kimono обеспечиваются наилучшие значения параметров по качеству и скорости (табл. 2). Как следует из рис. 5, для данной последовательности кривые RD почти такие же, как у исходного кодера.

Предложенный алгоритм обеспечивает сокращение времени кодирования в среднем на 17,03 %, как следует из данных, приведенных в табл. 3.

Таблица 1. Потеря качества и уменьшение скорости передачи предлагаемого алгоритма по сравнению с HM-16.20

Категория	Видеопоследовательность	$\Delta PSNR$, дБ	$\Delta \text{Битрейт}$, %
А 2560 × 1600	Traffic	0,026	-0,76
	PeopleOnStreet	0,029	-1,02
В 1920 × 1080	Kimono	0,004	-0,28
	ParkScene	0,021	0,06
	Cactus	0,026	-1,24
	BasketballDrive	0,010	-0,81
	BQTerrace	0,027	-2,11
С 832 × 480	BasketballDrill	0,035	-1,66
	BQMall	0,042	-1,26
	PartyScene	0,058	-0,61
	RaceHorses	0,030	-0,71
D 416 × 240	BasketballPass	0,041	-1,93
	BQSquare	0,065	-1,47
	BlowingBubbles	0,047	-0,98
	RaceHorses	0,039	-1,24
Е 1280 × 720	FourPeople	0,039	-2,46
	Johnny	0,025	-2,26
	KristenAndSara	0,033	-2,03
В среднем		0,033	-1,26

Таблица 2. Экспериментальные результаты для последовательности Kimono

Показатель	QP = 22	QP = 27	QP = 32	QP = 37	В среднем
$\Delta PSNR$, дБ	0,001	0,003	0,005	0,005	0,004
$\Delta \text{Битрейт}$, %	-0,17	-0,26	-0,31	-0,38	-0,28

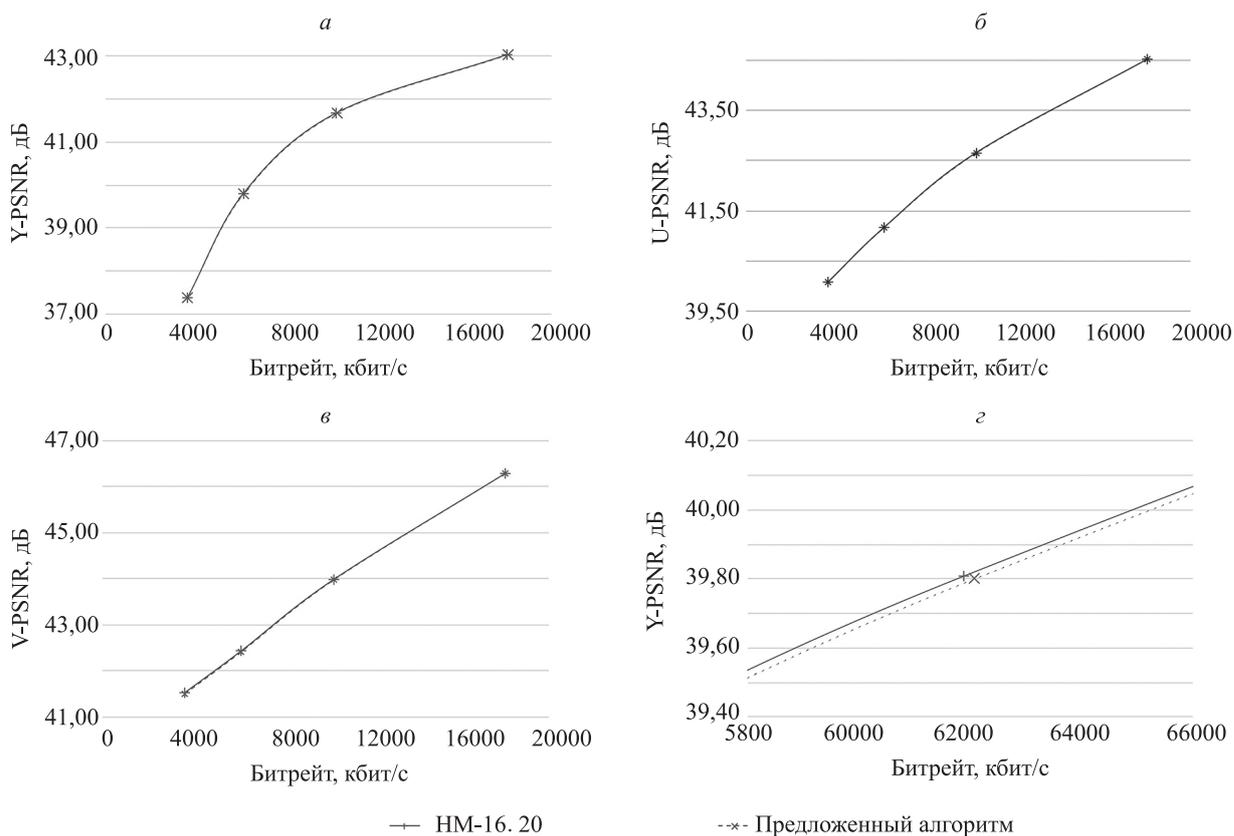


Рис. 5. RD-зависимости для видеопоследовательности Kimono: Y-PSNR(битрейт) (а); U-PSNR(битрейт) (б); V-PSNR(битрейт) (в); увеличенная часть RD-кривой вокруг QP 27 (г) (рис. 5, а)

Таблица 3. Снижение временных затрат предлагаемого алгоритма по сравнению с HM-16.20

Категория	Видеопоследовательность	$\Delta T, \%$			
		QP = 22	QP = 27	QP = 32	QP = 37
A 2560 × 1600	Traffic	10,11	12,09	15,41	21,69
	PeopleOnStreet	14,36	12,30	10,53	11,45
B 1920 × 1080	Kimono	33,81	40,26	13,24	15,36
	ParkScene	34,31	12,82	17,96	14,29
	Cactus	16,84	12,09	14,03	12,44
	BasketballDrive	9,83	10,99	12,03	10,05
	BQTerrace	13,15	11,86	12,76	17,27
C 832 × 480	BasketballDrill	34,33	34,30	37,50	39,13
	BQMall	9,06	12,91	10,05	13,06
	PartyScene	7,80	8,39	7,75	8,63
	RaceHorses	8,54	10,07	10,19	16,07
D 416 × 240	BasketballPass	22,22	22,36	27,79	24,24
	BQSquare	27,57	16,37	29,89	36,34
	BlowingBubbles	33,93	28,95	27,29	26,03
	RaceHorses	10,86	9,32	8,94	11,74
E 1280 × 720	FourPeople	11,56	10,30	14,82	11,57
	Johnny	11,77	14,90	13,61	11,72
	KristenAndSara	13,30	11,65	12,43	13,32
В среднем (по QP)		17,96	16,22	16,46	17,47
В среднем		17,03			

На основе полученных результатов экспериментов можно ожидать, что предложенный метод выбора режимов внутрикадрового предсказания обеспечивает меньшие вычислительные затраты, при этом производительность кодирования остается практически на том же уровне, что и у исходного кодера HEVC.

Заключение

В данной работе предложен быстрый алгоритм внутрикадрового кодирования для стандарта H.265.

Экспериментальные результаты показали, что данный алгоритм обеспечивает уменьшение время кодирования в среднем на 17,03 %. Качество и скорость передачи при этом снижаются незначительно – на 0,033 дБ и 1,26 % соответственно.

Предлагаемый быстрый алгоритм можно сочетать с алгоритмом, оптимизирующим процесс разделения кодовых единиц (Code Units), что является задачей дальнейших исследований в этой области.

Литература

1. Ohm J.-R., Sullivan G.J., Schwarz H., Tan T.K., Wiegand T. Comparison of the coding efficiency of video coding standards including high efficiency video coding (HEVC) // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2012. V. 22. N 12. P. 1669–1684. doi: 10.1109/TCSVT.2012.2221192
2. Wiegand T., Sullivan G.J., Bjontegaard G., Luthra A. Overview of the H.264/AVC video coding standard // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2003. V. 13. N 7. P. 560–576. doi: 10.1109/TCSVT.2003.815165
3. Sullivan G.J., Ohm J.-R., Han W.-J., Wiegand T. Overview of the high efficiency video coding (HEVC) standard // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2012. V. 22. N 12. P. 1649–1668. doi: 10.1109/TCSVT.2012.2221191
4. Lainema J., Bossen F., Han W.-J., Min J., Ugrur K. Intra coding of the HEVC standard // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2012. V. 22. N 12. P. 1792–1801. doi: 10.1109/TCSVT.2012.2221525
5. Piao Y., Min J., Chen J. Encoder improvement of unified intra prediction // *JCT-VC*, C207. Guangzhou, CN, 2010.
6. Hosseini E., Pakdaman F., Hashemi M.R., Ghanbari M. A computationally scalable fast intra coding scheme for HEVC video encoder // *Multimedia Tools and Applications*. 2019. V. 78. N 9. P. 11607–11630. doi: 10.1007/s11042-018-6713-y
7. Min B., Cheung R.C. A fast CU size decision algorithm for the HEVC intra encoder // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2015. V. 25. N 5. P. 892–896. doi: 10.1109/TCSVT.2014.2363739
8. Нгуен Ван Чьонг, Тропченко А.А., Доан Тиен Бан. Повышение эффективности метода кодирования внутрикадровым предсказанием в стандарте H.265/HEVC // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018. Т. 18. № 2. С. 255–261. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-255-261
9. Jamali M., Coulombe S. Coding unit splitting early termination for fast HEVC intra coding based on global and directional gradients // *Proc. 18th IEEE International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP 2016)*. 2016. P. 7813356. doi: 10.1109/MMSP.2016.7813356
10. Kim H.-S., Park R.-H. Fast CU partitioning algorithm for HEVC using an online-learning-based Bayesian decision rule // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2016. V. 26. N 1. P. 130–138. doi: 10.1109/TCSVT.2015.2444672
11. Tseng C.-F., Lai Y.-T. Fast coding unit decision and mode selection for intra-frame coding in high-efficiency video coding // *IET Image Processing*. 2016. V. 10. N 3. P. 215–221. doi: 10.1049/iet-ipr.2015.0154
12. Zhang H., Ma Z. Fast intra prediction for high efficiency video coding // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2012. V. 7674. P. 568–577. doi: 10.1007/978-3-642-34778-8_53
13. Gwon D., Choi H., Youn J.M. HEVC fast intra mode decision based on edge and SATD cost // *Proc. 1st Asia Pacific Conference on Multimedia and Broadcasting*. 2015. P. 74–78. doi: 10.1109/APMediaCast.2015.7210287
14. Kim T.S., Sunwoo M.H., Chung J.-G. Hierarchical fast mode decision algorithm for intra prediction in HEVC // *Proc. IEEE International Symposium Circuits and Systems (ISCAS)*. 2015. P. 2792–2795. doi: 10.1109/ISCAS.2015.7169266
15. Lu X., Xiao N., Hu Y., Wu Z., Martin G. Fast mode decision for HEVC intra coding with efficient mode skipping and improved

References

1. Ohm J.-R., Sullivan G.J., Schwarz H., Tan T.K., Wiegand T. Comparison of the coding efficiency of video coding standards including high efficiency video coding (HEVC). *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2012, vol. 22, no. 12, pp. 1669–1684. doi: 10.1109/TCSVT.2012.2221192
2. Wiegand T., Sullivan G.J., Bjontegaard G., Luthra A. Overview of the H.264/AVC video coding standard. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003, vol. 13, no. 7, pp. 560–576. doi: 10.1109/TCSVT.2003.815165
3. Sullivan G.J., Ohm J.-R., Han W.-J., Wiegand T. Overview of the high efficiency video coding (HEVC) standard. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2012, vol. 22, no. 12, P. 1649–1668. doi: 10.1109/TCSVT.2012.2221191
4. Lainema J., Bossen F., Han W.-J., Min J., Ugrur K. Intra coding of the HEVC Standard. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2012, vol. 22, no. 12, pp. 1792–1801. doi: 10.1109/TCSVT.2012.2221525
5. Piao Y., Min J., Chen J. Encoder improvement of unified intra prediction. *JCT-VC*, C207. Guangzhou, CN, 2010.
6. Hosseini E., Pakdaman F., Hashemi M.R., Ghanbari M. A computationally scalable fast intra coding scheme for HEVC video encoder. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, vol. 78, no. 9, pp. 11607–11630. doi: 10.1007/s11042-018-6713-y
7. Min B., Cheung R.C. A fast CU size decision algorithm for the HEVC intra encoder. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2015, vol. 25, no. 5, pp. 892–896. doi: 10.1109/TCSVT.2014.2363739
8. Nguyen Van Truong, Tropchenko A.A., Doan Tien Ban. Efficiency improvement of coding method by intraframe prediction in H.265/HEVC standard. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 255–261. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-255-261
9. Jamali M., Coulombe S. Coding unit splitting early termination for fast HEVC intra coding based on global and directional gradients. *Proc. 18th IEEE International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP 2016)*, 2016, pp. 7813356. doi: 10.1109/MMSP.2016.7813356
10. Kim H.-S., Park R.-H. Fast CU partitioning algorithm for HEVC using an online-learning-based Bayesian decision rule. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2016, vol. 26, no. 1, pp. 130–138. doi: 10.1109/TCSVT.2015.2444672
11. Tseng C.-F., Lai Y.-T. Fast coding unit decision and mode selection for intra-frame coding in high-efficiency video coding. *IET Image Processing*, 2016, vol. 10, no. 3, pp. 215–221. doi: 10.1049/iet-ipr.2015.0154
12. Zhang H., Ma Z. Fast intra prediction for high efficiency video coding. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2012, vol. 7674, pp. 568–577. doi: 10.1007/978-3-642-34778-8_53
13. Gwon D., Choi H., Youn J.M. HEVC fast intra mode decision based on edge and SATD cost. *Proc. 1st Asia Pacific Conference on Multimedia and Broadcasting*, 2015, pp. 74–78. doi: 10.1109/APMediaCast.2015.7210287
14. Kim T.S., Sunwoo M.H., Chung J.-G. Hierarchical fast mode decision algorithm for intra prediction in HEVC. *Proc. IEEE International Symposium Circuits and Systems (ISCAS)*, 2015, pp. 2792–2795. doi: 10.1109/ISCAS.2015.7169266

- RMD // Proc. 18th IEEE International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP 2016). 2016. P. 7813355. doi: 10.1109/MMSP.2016.7813355
16. Wang Y., Fan X., Zhao L., Ma S., Zhao D., Gao W. A fast intra coding algorithm for HEVC // Proc. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2014. P. 4117–4121. doi: 10.1109/ICIP.2014.7025836
17. Shang X., Wang G., Fan T., Li Y. Fast CU size decision and PU mode decision algorithm in HEVC intra coding // Proc. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). 2015. P. 1593–1597. doi: 10.1109/ICIP.2015.7351069
18. Zhang T., Sun M.-T., Zhao D., Gao W. Fast intra-mode and CU size decision for HEVC // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. 2017. V. 27. N 8. P. 1714–1726. doi: 10.1109/TCSVT.2016.2556518
15. Lu X., Xiao N., Hu Y., Wu Z., Martin G. Fast mode decision for HEVC intra coding with efficient mode skipping and improved RMD. *Proc. 18th IEEE International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSP 2016)*, 2016, pp. 7813355. doi: 10.1109/MMSP.2016.7813355
16. Wang Y., Fan X., Zhao L., Ma S., Zhao D., Gao W. A fast intra coding algorithm for HEVC. *Proc. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2014, pp. 4117–4121. doi: 10.1109/ICIP.2014.7025836
17. Shang X., Wang G., Fan T., Li Y. Fast CU size decision and PU mode decision algorithm in HEVC intra coding. *Proc. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2015, pp. 1593–1597. doi: 10.1109/ICIP.2015.7351069
18. Zhang T., Sun M.-T., Zhao D., Gao W. Fast intra-mode and CU size decision for HEVC. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2017, vol. 27, no. 8, pp. 1714–1726. doi: 10.1109/TCSVT.2016.2556518

Авторы

Доан Бан Тиен — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-0900-6284, bandoan@mail.ru

Тропченко Андрей Александрович — кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57197815120, ORCID ID: 0000-0001-9812-7947, zayka_98rus@mail.ru

Authors

Doan Tien Ban — Postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-0900-6284, bandoan@mail.ru

Andrey A. Tropchenko — PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57197815120, ORCID ID: 0000-0001-9812-7947, zayka_98rus@mail.ru