

Современная теория информации

Лекция 10. Сжатие и передача видеинформации.

Содержание лекции

- ① Оценка и компенсация движения.
- ② Стандарты сжатия видеоинформации.
- ③ Стандарт H.264/AVC.
- ④ Управление битовой скоростью ТМ5.
- ⑤ Передача видеоинформации по каналам с потерями пакетов.

1. Оценка и компенсация движения

Межкадровая схожесть

- Соседние кадры похожи.



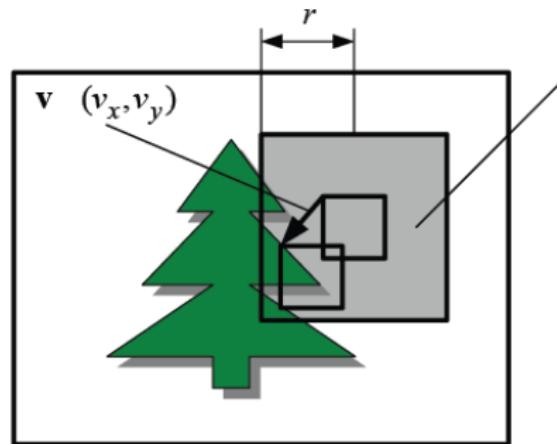
Previous frame



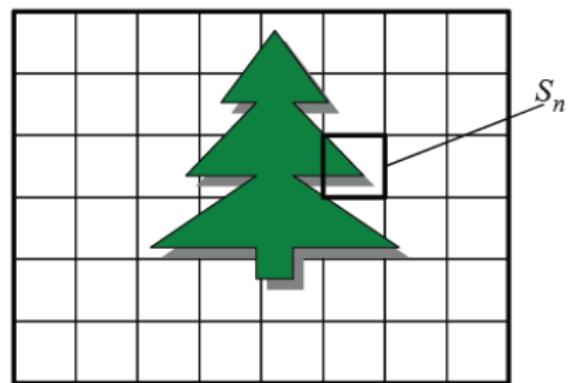
Current frame

1. Оценка и компенсация движения

Блоковая компенсация движения



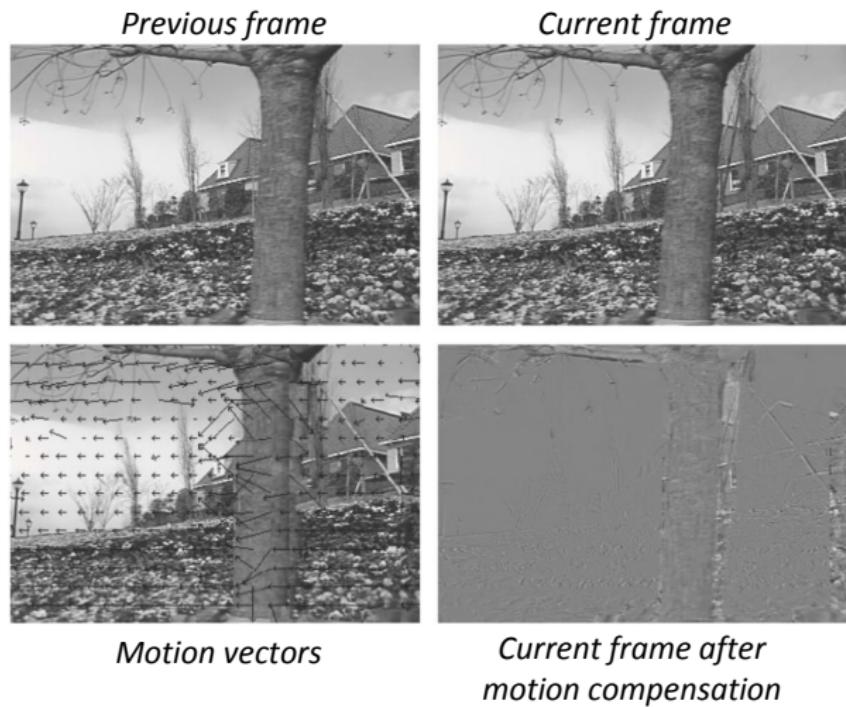
Previous frame



Current frame

1. Оценка и компенсация движения

Блоковая компенсация движения



- Кодеки, начиная с H.261/MPEG-1 (1990) до H.266/VVC (2020), используют компенсацию движения.

2. Стандарты сжатия видеоинформации

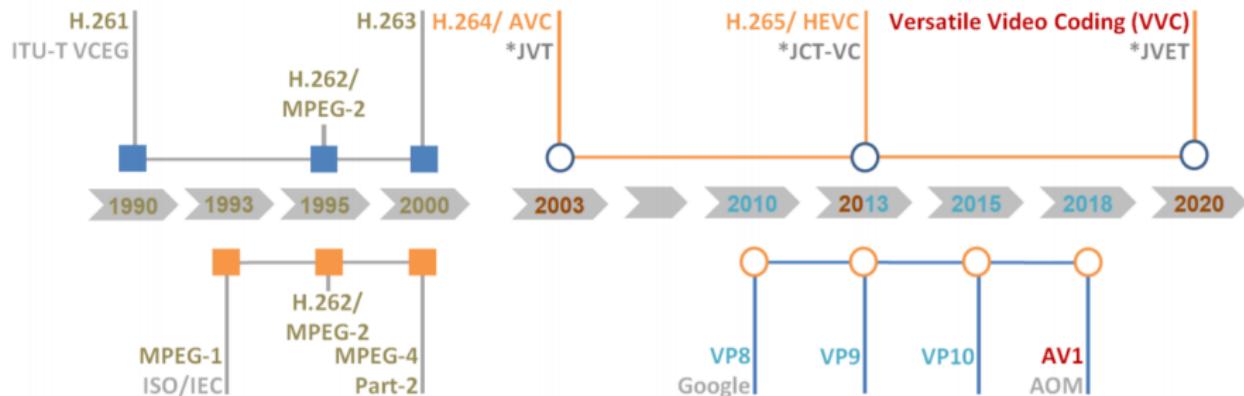
Стандартизационные группы

Две основные организации участвуют в разработке стандартов:

- **ITU-T Video Coding Experts Group (VCEG)** International Telecommunications Union – Telecommunications Standardization Sector (ITU-T).
- **ISO/IEC Moving Picture Experts Group (MPEG)**. ISO - International Standardization Organization and IEC - International Electrotechnical Commission.

2. Стандарты сжатия видеоинформации

Хронология

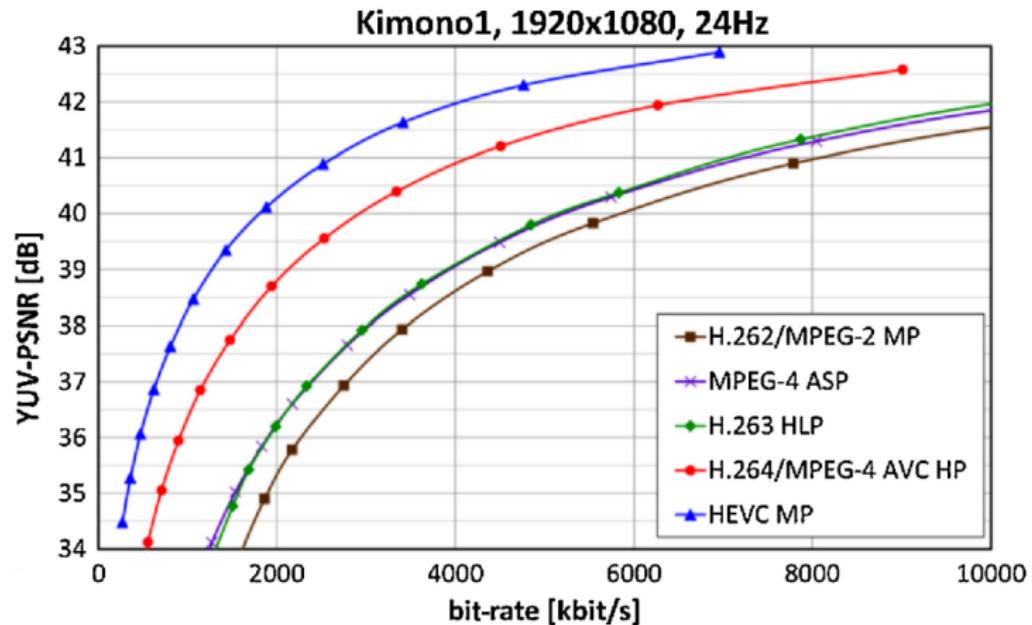


В зависимости от организации, стандарт H.264 может иметь разные названия:

- Advanced Video Coding for Generic Audiovisual Services, ITU-T Rec. H.264 and ISO/IEC 14496-10 (AVC), 2009.
- MPEG-4 Part 10, Advanced Video Coding (MPEG-4 AVC).

2. Стандарты сжатия видеоинформации

Сравнение стандартов¹



¹J. Ohm et al., Comparison of the Coding Efficiency of Video Coding Standards, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2012.

2. Стандарты сжатия видеоинформации

Сравнение стандартов²

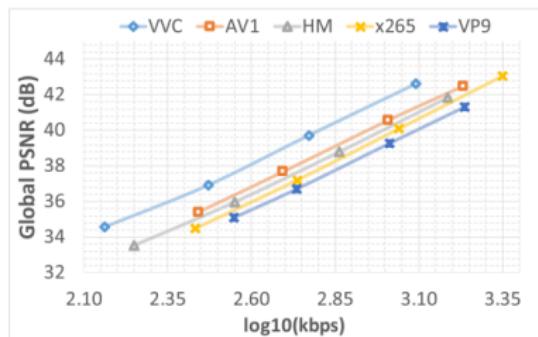
(a)

Encoding	Bitrate Savings Relative to			
	AV1	HM	X265	VP9
VVC	27%	34.8%	40.2%	46.5%
AV1	-	10.9%	18.7%	28.3%
HM (HEVC)	-	-	8.9%	19.5%
X265 (HEVC)	-	-	-	11.9%

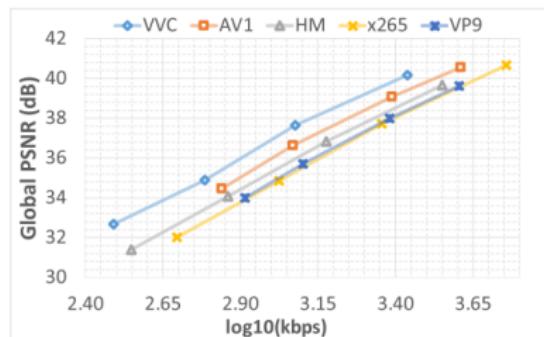
(b)

Encoding	Bitrate Savings Relative to			
	AV1	HM	X265	VP9
VVC	22.2%	34.3%	45%	43.1%
AV1	-	16.9%	30.6%	27.1%
HM (HEVC)	-	-	14.9%	10.1%
X265 (HEVC)	-	-	-	-4.4% ^a

^aVP9 reduces bitrate demands by 4.4% compared to x265



(a)



(b)

FIGURE 9. (a) Netflix video dataset I rate-distortion curves (PSNR vs \log (bitrate) of mean values). (b) Netflix video dataset II rate-distortion curves (PSNR vs \log (bitrate) of average^a values). ^a Average values of the three videos used better capture the compression performance trend.

² A. S. Panayides et al., "The Battle of the Video Codecs in the Healthcare Domain - A Comparative Performance Evaluation Study Leveraging VVC and AV1," IEEE Access, 2020.

2. Стандарты сжатия видеоинформации

Эталонные модели стандартов

- Эталонная модель стандарта H.264,
<https://avc.hhi.fraunhofer.de/>
- Эталонная модель стандарта H.265,
<https://hevc.hhi.fraunhofer.de/>
- Эталонная модель стандарта H.266,
<https://jvet.hhi.fraunhofer.de/>
- Обзор стандарта H.266
 - ① Зарегистрироваться на сайте конференции ICIP 2020 (<https://2020.ieeeicip.org/>).
 - ② Versatile Video Coding - Algorithms And Specification (<https://icip-virtual.org/presentation/tutorial/versatile-video-coding-algorithms-and-specification>)

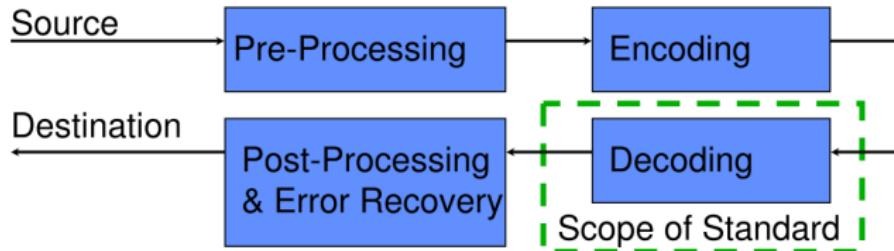
3. Стандарт H.264/AVC

Отличия от MPEG-2

Feature	MPEG-2	H.264/AVC
Reference picture	1	Multiple
Pel accuracy	Integer, 1/2	Integer, 1/2, 1/4
In-loop filter	No	Yes
Block size	8×8	$16 \times 16, 8 \times 16, 16 \times 8, 8 \times 8, 4 \times 8, 8 \times 4, 4 \times 4$
Transform	8×8 DCT	$4 \times 4, 8 \times 8$ Int DCT, $4 \times 4, 2 \times 2$ Hadamard
Entropy coding	VLC	CAVLC, CABAC

3. Стандарт H.264/AVC

Область действия H.264/AVC standard³

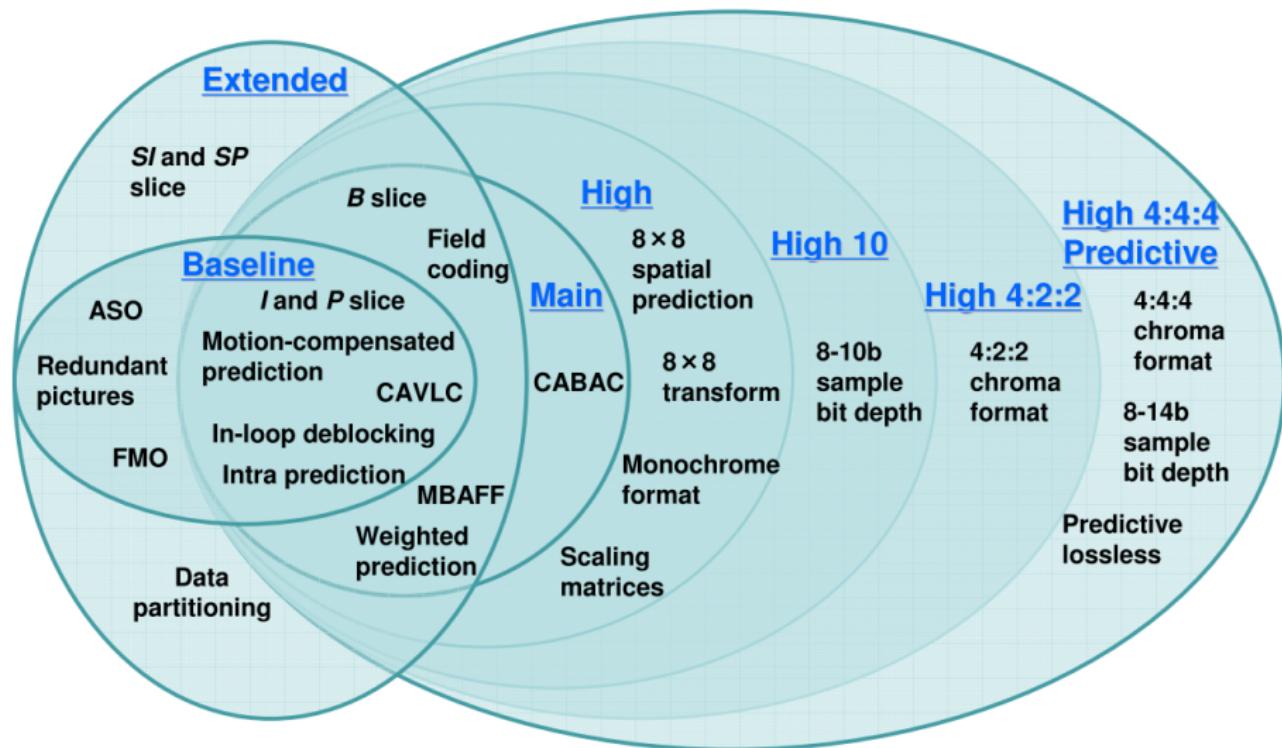


- В стандарте описан только декодер, то есть, синтаксис битового потока имеет однозначно интерпретируемую структуру, что позволяет декодерам воспроизводить одну и ту же видеопоследовательность для одного и того же битового потока.
- При этом реализация кодеров может сильно отличаться по эффективности и вычислительной сложности, что позволяет адаптировать стандарт к приложениям имеющим различные требования по объему используемой памяти, задержке, сложности кодирования и т.д.

³T.Wiegand, G.Sullivan et al., Overview of the H.264/AVC Video Coding Standard, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003.

3. Стандарт H.264/AVC

Профили стандарта



3. Стандарт H.264/AVC

Схема кодера

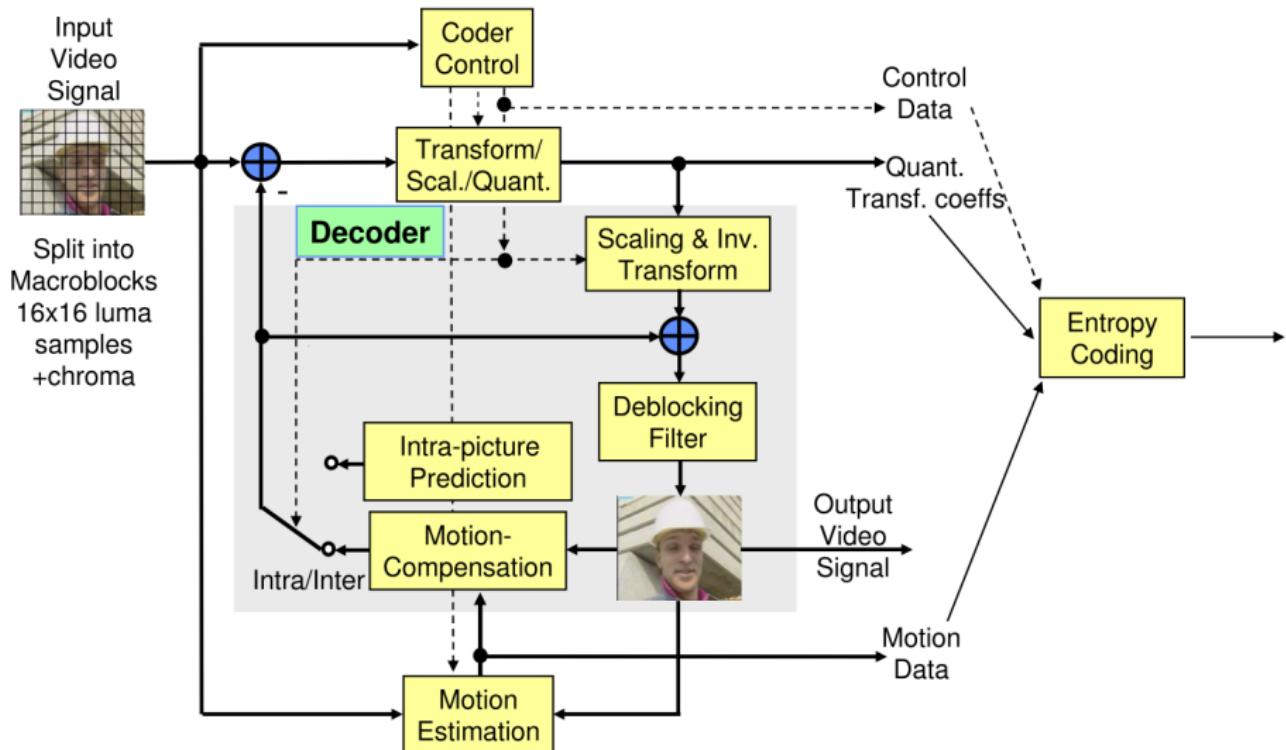
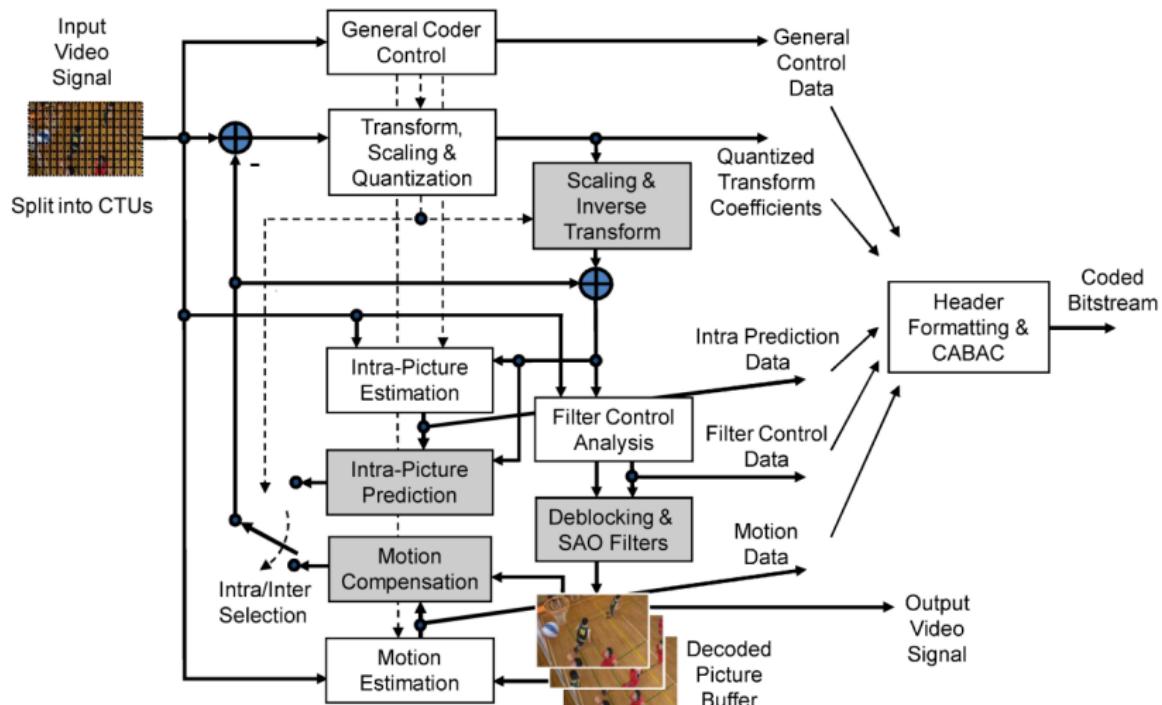


Схема кодера H.265/HEVC⁴

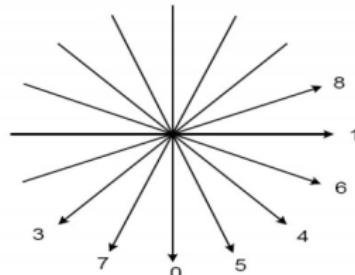


⁴G. J. Sullivan, J. Ohm, W. Han and T. Wiegand, "Overview of the High Efficiency Video Coding (HEVC) Standard," in IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2012.

3. Стандарт H.264/AVC

Интра предсказание

M	A	B	C	D	E	F	G	H
I	a	b	c	d				
J	e	f	g	h				
K	i	j	k	l				
L	m	n	o	p				



Mode 0

M	A	B	C	D	E	F	G	H
I								
J								
K								
L	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼



Mode 1

M	A	B	C	D	E	F	G	H
I								
J								
K								
L					▶	▶	▶	▶



Mode 2

M	A	B	C	D	E	F	G	H
I								
J	(A+B+C+D+ I+J+K+L)/8							
K								
L								



Mode 3

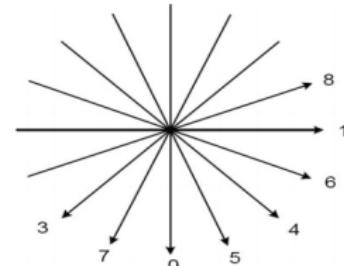
M	A	B	C	D	E	F	G	H
I	◀							
J	◀							
K	◀							
L	◀	◀	◀	◀	◀	◀	◀	◀



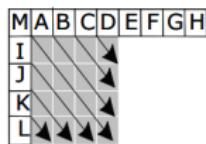
3. Стандарт H.264/AVC

Интра предсказание

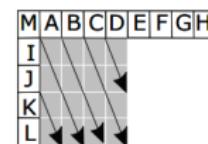
M	A	B	C	D	E	F	G	H
I	a	b	c	d				
J	e	f	g	h				
K	i	j	k	l				
L	m	n	o	p				



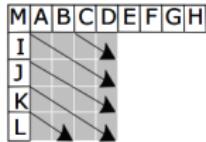
Mode 4



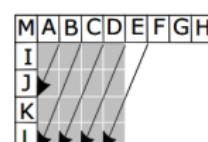
Mode 5



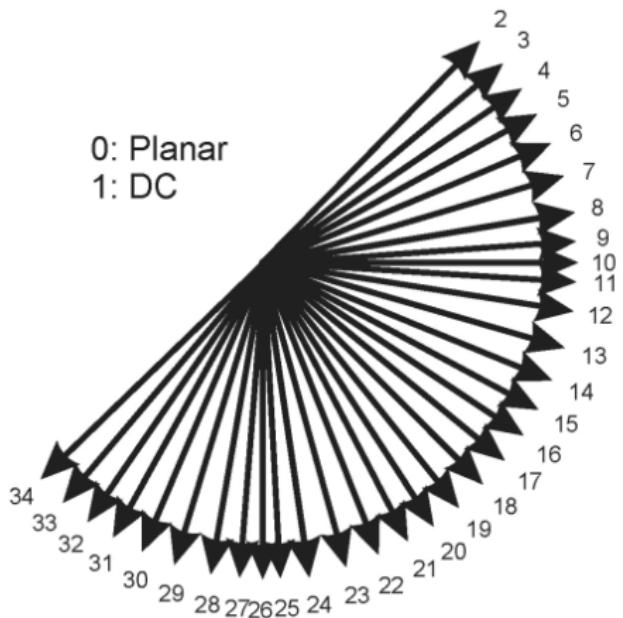
Mode 6



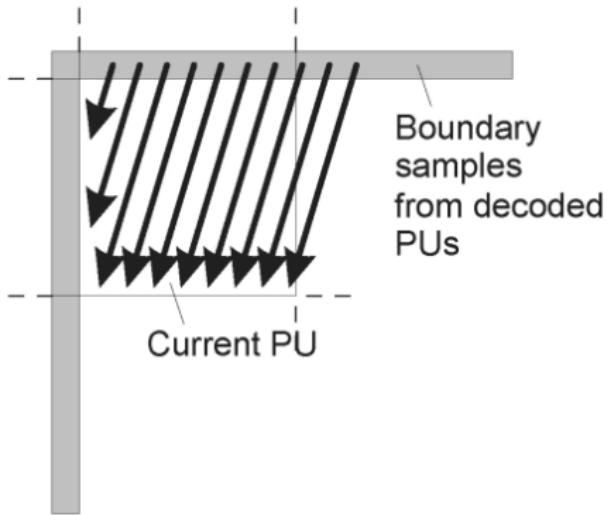
Mode 7



Интра предсказание в H.265/HEVC



Example: Directional mode 29



Интра предсказание в H.266/VVC⁵

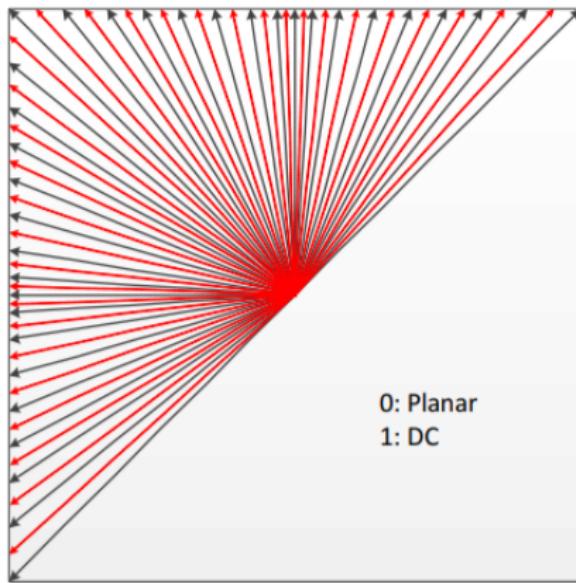
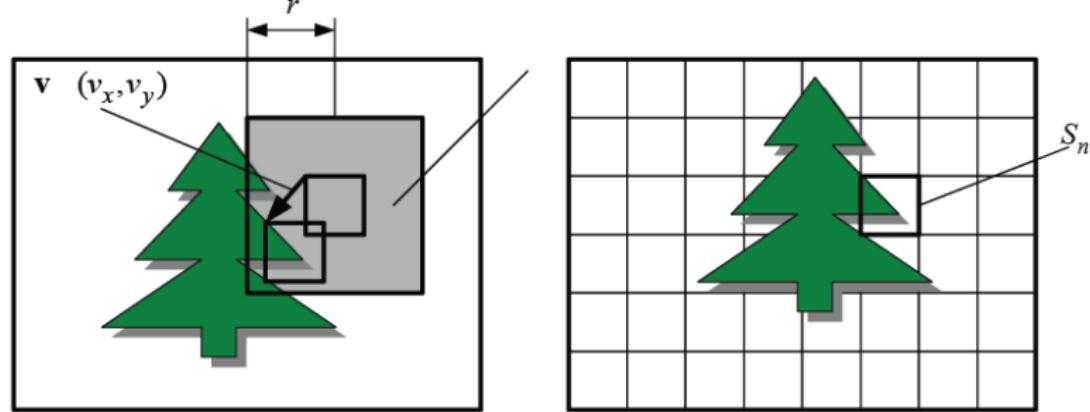


Fig. 2. 67 intra prediction modes of VVC

⁵H. Yang et al., "Low-Complexity CTU Partition Structure Decision and Fast Intra Mode Decision for Versatile Video Coding," in IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2020.

3. Стандарт H.264/AVC

Блоковая компенсация движения



Previous frame

Current frame

Для каждого блока S_n в текущем кадре n выполняется поиск блока S_k минимизирующего

$$J(\mathbf{v}) = \sum_{(x,y) \in S_n} |s_n(x, y) - s_k(x + v_x, y + v_y)|,$$

где $\mathbf{v} = (v_x, v_y)$ – вектор движения, $|v_x| \leq r$, $|v_y| \leq r$, r – радиус поиска, $s_j(x, y)$ – значение пикселя с координатами (x, y) в кадре j .

3. Стандарт H.264/AVC

Блоковая компенсация движения

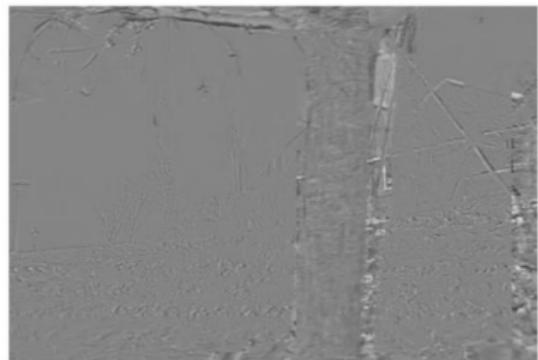
Previous frame



Current frame



Motion vectors

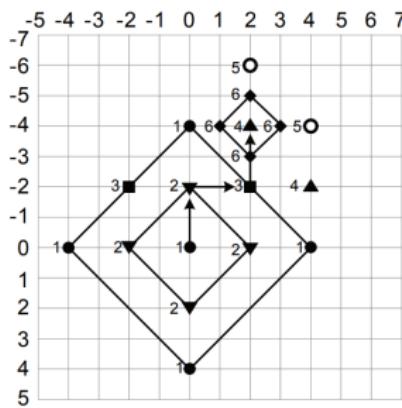


Current frame after

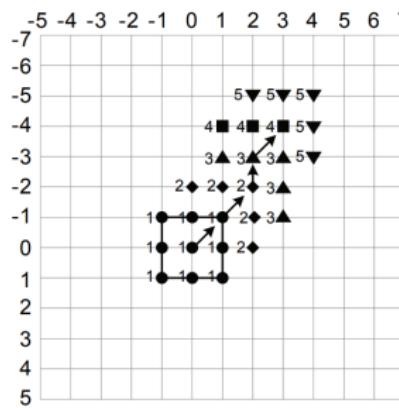
3. Стандарт H.264/AVC

Быстрые алгоритмы поиска векторов движения

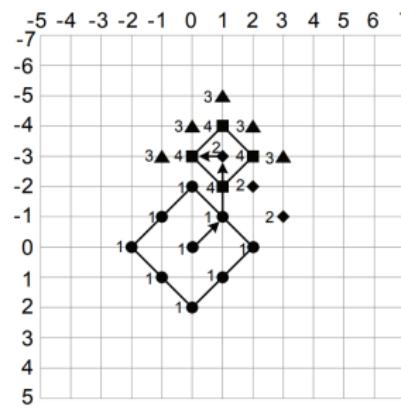
- Полный поиск требует $(2 \cdot r + 1)^2$ раз вычислить метрику $J(\mathbf{v})$.
- Для $r = 7$ Diamond search проверяет в среднем 15.5 метрик вместо 225 без существенной потери в эффективности кодирования⁶.



Logarithmic
search



Gradient
search



Diamond
search

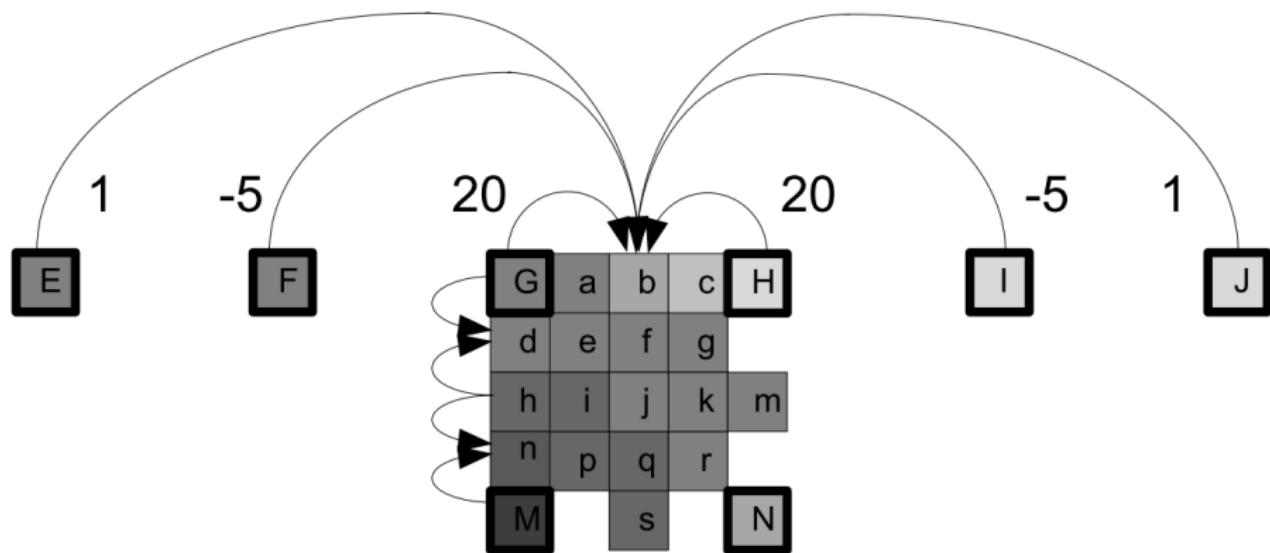
⁶Y.Tham et al. A novel unrestricted center-biased diamond search algorithm for block motion estimation, *IEEE Trans. Circuits Systems for Video Technology*, 1998.



3. Стандарт H.264/AVC

Вычисление векторов с половинной и четвертьпиксельной точностью

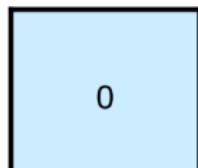
- Выполняется поиск целочисленного вектора
- Интерполируются четверичные и половинные значения пикселей.
- Example: $b = (E - 5 \cdot F + 20 \cdot G + 20 \cdot H - 5 \cdot I + J + 16) \gg 5$



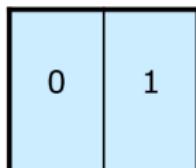
3. Стандарт H.264/AVC

Режимы разбения макроблоков

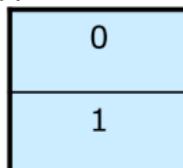
- Используется древовидное иерархическое разбиение блоков при компенсации движения.
- Это позволяет использовать от 1 до 16 векторов на макроблок.



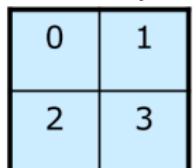
Mode 1
1 16x16 block



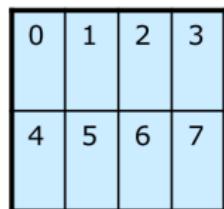
Mode 2
2 16x8 blocks



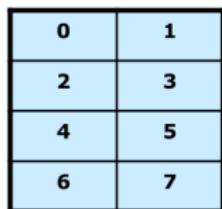
Mode 3
2 8x16 blocks



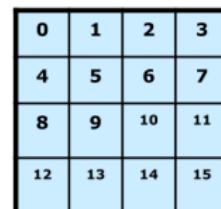
Mode 4
4 8x8 blocks



Mode 5
8 8x4 blocks



Mode 6
8 4x8 blocks

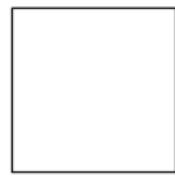


Mode 7
16 4x4 blocks

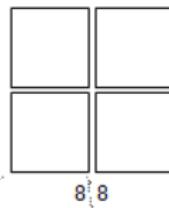
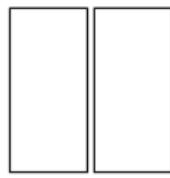
3. Стандарт H.264/AVC

Режимы разбиения макроблоков

For each macroblock do:



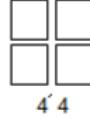
If Cost_{16'16} < T_{16'16}
then skip



For each 8' 8 block do:



If Cost_{8'8} < T_{8'8}
then skip



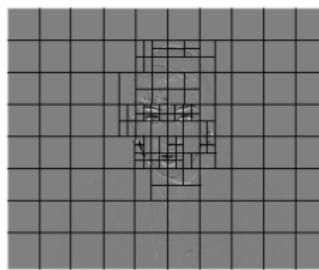
3. Стандарт H.264/AVC

Режимы разбиения макроблоков

- Большее число векторов на макроблок в общем случае обеспечивает лучшее предсказание. Однако, большее количество векторов требует большего количества бит. Поэтому, с точки зрения функции скорость-искажение более эффективно выполнять разбиение учитывая биты на векторы движения.
- Вместо $J(\mathbf{v})$ используется

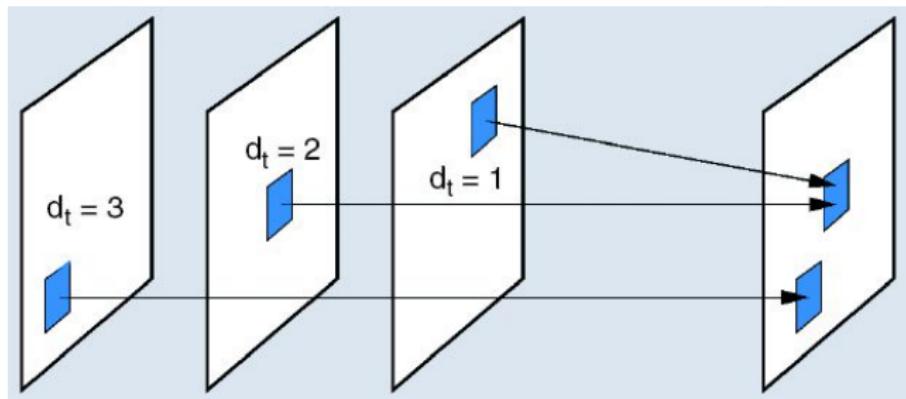
$$\Omega(\mathbf{v} = J(\mathbf{v}) + \lambda(QP) \cdot R(\mathbf{v}),$$

где $R(\mathbf{v})$ – число бит на вектор(ы) движения, $\lambda(QP)$ – множитель Лагранжа, зависящий от параметра квантования QP . Чем больше QP , тем больше $\lambda(QP)$.



3. Стандарт H.264/AVC

Использование нескольких кадров при компенсации движения



3. Стандарт H.264/AVC

Фильтр компенсации искажений на границах блоков

- Фильтр является частью алгоритма компенсации движения, поэтому он выполняется как в кодере, так и в декодере.
- За счёт устранения искажений на границах блоков повышается эффективность компенсации движения.



before the deblocking filter

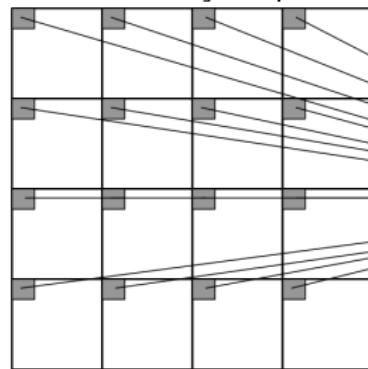


after the deblocking filter

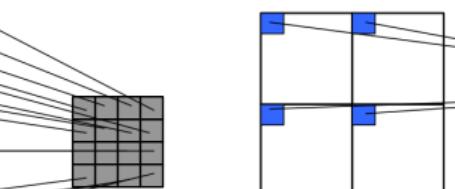
3. Стандарт H.264/AVC

Преобразование и квантование

- 8×8 , 4×4 и 2×2 целочисленные преобразования используются вместо 8×8 ДКП.
- Целочисленность преобразования позволяет получить одинаковый результат на разных платформах.
- Преобразование и квантование выполняются совместно, что позволяет выполнять лишь одно умножение на коэффициент.
- В интра режиме, 4×4 преобразования применяются к соответствующим 16 DC коэффициентам.



16x16 luma



8x8 CbCr

2x2 DC
components

3. Стандарт H.264/AVC

Побуквенное и арифметическое кодирование

Два метода кодирования предусмотрены:

- ① CAVLC (context-adaptive variable-length coding).

- ▶ Используется код Голомба.

0	$\Rightarrow 0 \Rightarrow 1 \Rightarrow 1 $
1	$\Rightarrow 1 \Rightarrow 10 \Rightarrow 01 0$
-1	$\Rightarrow 2 \Rightarrow 11 \Rightarrow 01 1$
2	$\Rightarrow 3 \Rightarrow 100 \Rightarrow 001 00$
-2	$\Rightarrow 4 \Rightarrow 101 \Rightarrow 001 01$
3	$\Rightarrow 5 \Rightarrow 110 \Rightarrow 001 10$
-3	$\Rightarrow 6 \Rightarrow 111 \Rightarrow 001 11$
4	$\Rightarrow 7 \Rightarrow 1000 \Rightarrow 0001 000$
-4	$\Rightarrow 8 \Rightarrow 1001 \Rightarrow 0001 001$

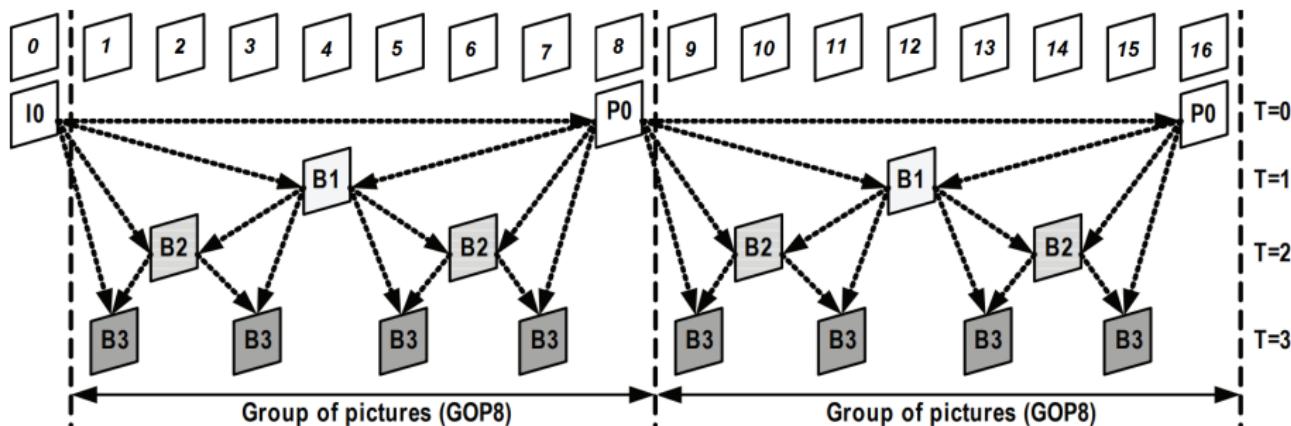
- ▶ Используются разные VLC таблицы в зависимости от предыдущего символа.

- ② CABAC (context-adaptive binary arithmetic coder coding).

Уменьшает битовый поток на 10-15% по сравнению с CAVLC.

3. Стандарт H.264/AVC

Иерархическая структура группы кадров



- Обеспечивает иерархический поток видеоданных (с разной кадровой скоростью).

4. Управление битовой скоростью TM5

- Пусть кодер должен генерировать битрейт видеопотока c .
- Входные кадры делятся на группы кадров (groups of frames , GOP).
- **GOP level RC.** $\hat{R}_I + N_P \cdot \hat{R}_P + N_B \cdot \hat{R}_B = R_{GOP}$, где $R_{GOP} = \frac{1+N_P+N_B}{fps} \cdot c$ - битовый бюджет на каждый GOP, $\hat{R}_I, \hat{R}_P, \hat{R}_B$ – целевые значения числа бит на I, P и B кадры, соответственно, и $\hat{R}_I \geq \hat{R}_P \geq \hat{R}_B$.
- **Frame level RC.** \hat{R} – обеспечивается при помощи *виртуального буфера*, т.е., для каждого макроблока вычисляется число бит в буфере b_i как

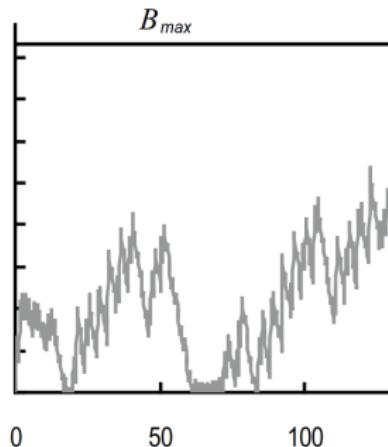
$$b_{i+1} = b_i + r(q_{i+1}) - \frac{\hat{R}}{M},$$

где M – число макроблоков в кадре, и шаг квантования q_{i+1} вычисляются как

$$q_{i+1} = \alpha \cdot \frac{b_i}{B_{max}},$$

где α – константа, и B_{max} – максимальное число бит в буфере.

4. Управление битовой скоростью ТМ5



- Если в процессе кодирования $0 \leq b_i \leq B_{max}$, то

$$\sum_{i=1}^M \frac{\hat{R}}{M} \leq \sum_{i=1}^M r(q_i) \leq \sum_{i=1}^M \frac{\hat{R}}{M} + B_{max},$$

или

$$\hat{R} \leq R \leq \hat{R} + B_{max}.$$

5. Передача видео по каналам с потерями пакетов

Пример распространения ошибки

- Допустим, что кадр 21 не был доставлен декодеру (потерян).
- Вместо кадра 21 декодер покажет.
- Поскольку кодер и декодер ссылаются на разные кадры, появляются искажения при декодировании, т.е., распространение ошибки от кадра к кадру.



20

21

22

23

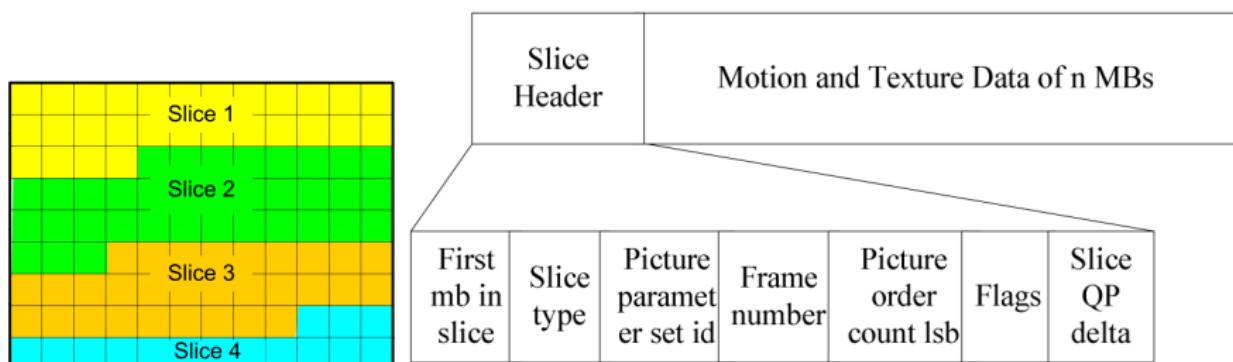
24

35

5. Передача видео по каналам с потерями пакетов

Сегменты (slices) в H.264/AVC

- Видеокадр разбивается на макроблоки перед кодированием.
- Несколько макроблоков составляют один сегмент (slice).
- Один кадр может состоять из нескольких сегментов.
- Сегменты могут быть типа I, P, или B-сегменты.



5. Передача видео по каналам с потерями пакетов

Абстрактный сетевой уровень в H.264/AVC

- Network abstract layer (NAL) это интерфейс между уровнем битового потока и сетевым уровнем.
- NAL кодер помещает битовый поток сегмента в NAL пакет, который может быть передан в пакетной сети.
- NAL может быть принят и декодирован независимо от остальных NAL.

NAL пакет содержит заголовок и основную часть:

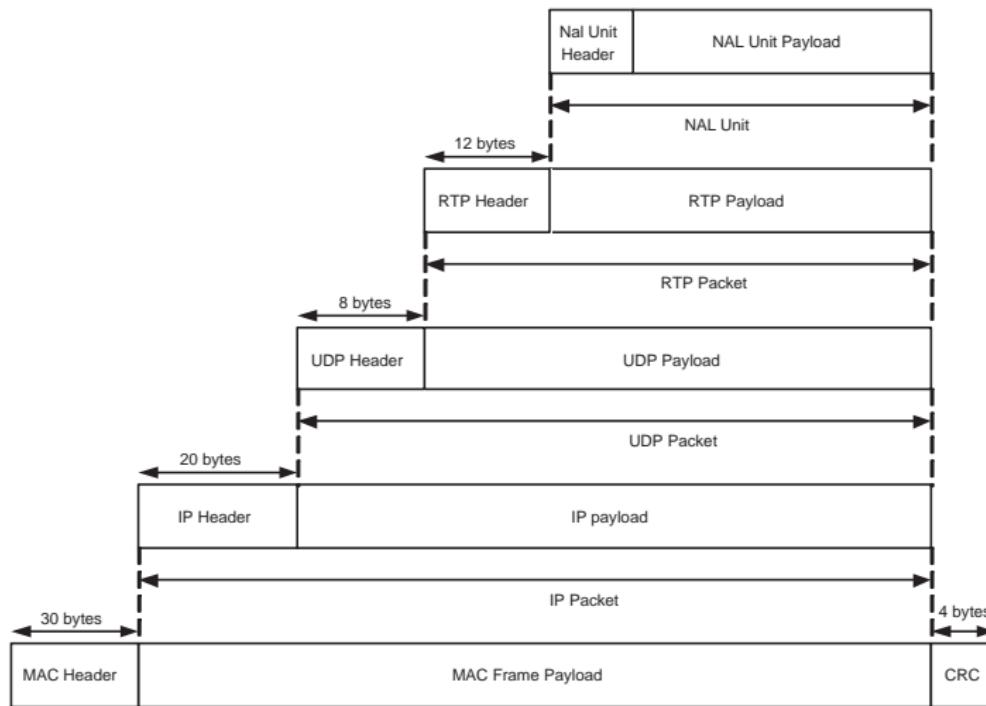


Sequence parameter set	Picture parameter set	I slice	Picture delimiter	P slice	P slice
------------------------	-----------------------	---------	-------------------	---------	---------

5. Передача видео по каналам с потерями пакетов

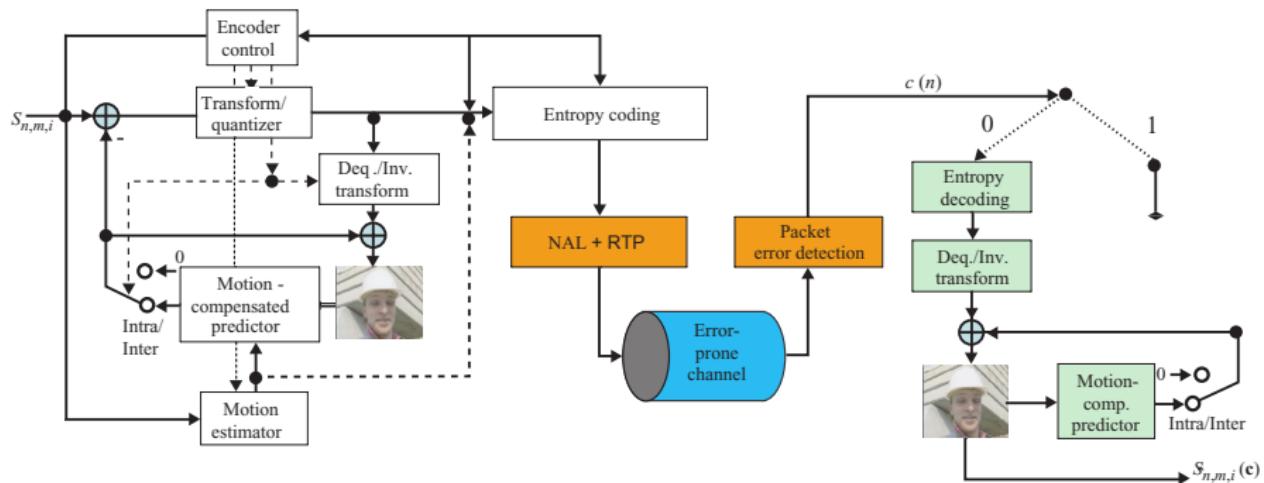
Пакетизация

NAL пакеты разделяются 4-байтной последовательностью 00 00 00 01 или помещаются в RTP пакет.



5. Передача видео по каналам с потерями пакетов

Абстрактный сетевой уровень в H.264/AVC



5. Передача видео по каналам с потерями пакетов

Декодирование ошибок в декодере H.264/AVC

При возникновении ошибок декодер должен:

- Обнаружить ошибку;
- Ресинхронизировать декодирование;
- Компенсировать искажения, которые вызваны потерями пакетов.

Обнаружение ошибок – может быть выполнено с учетом знания о синтаксисе битового потока. Например, когда обнаруживаются синтаксические элементы за пределами разрешенного диапазона, то декодер должен **ресинхронизировать** декодирование, т.е., начать декодировать со следующего стартового кода.

Пакеты с обнаруженными ошибками не декодируются (*skipped*) и для соответствующей области кадра выполняется процедура компенсации искажений (*error concealment*), которая пытается минимизировать визуальные искажения.

5. Передача видео по каналам с потерями пакетов

Декодирование ошибок в декодере H.264/AVC

Стандарт H.264/AVC определяет синтаксические элементы, такие как векторы движения, коэффициенты преобразования, индексы кадров и т.д., и порядок, в котором они должны следовать в битовом потоке. При возникновении ошибки, могут возникнуть следующие ситуации:

- Недопустимое значение синтаксического элемента.
- Декодировано более 16-ти коэффициентов в блоке 4x4 и т.д.

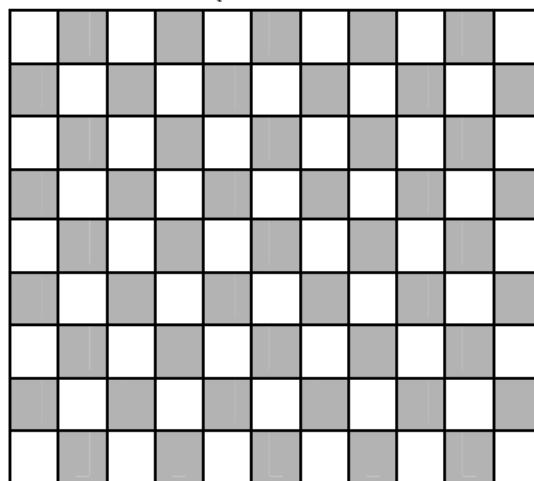
Resync Marker	MB Index	Quant Info	HEC and Header Repetition (if present)	Motion Vector	Motion Marker	Texture (DCT)	Resync Marker	...
---------------	----------	------------	--	---------------	---------------	---------------	---------------	-----

Поведение декодера при возникновении ошибок описано в стандарте, однако способ компенсации искажений, вызванных ошибками находится вне рамок стандарта H.264/AVC.

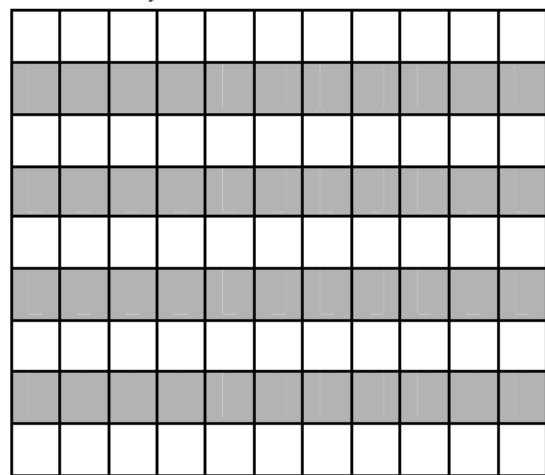
5. Передача видео по каналам с потерями пакетов

Гибкая структура сегмента

Кодер H.264 помещает группы макроблоков в сегмент, пока размер сегмента не достигнет максимального размера пакета для передачи в данной сети (maximum transportation unit, MTU).



FMO checker board mode.



FMO interleaving mode.

В случае использования гибкой структуры сегмента, а карта распределения макроблоков добавляется в битовый поток.

5. Передача видео по каналам с потерями пакетов

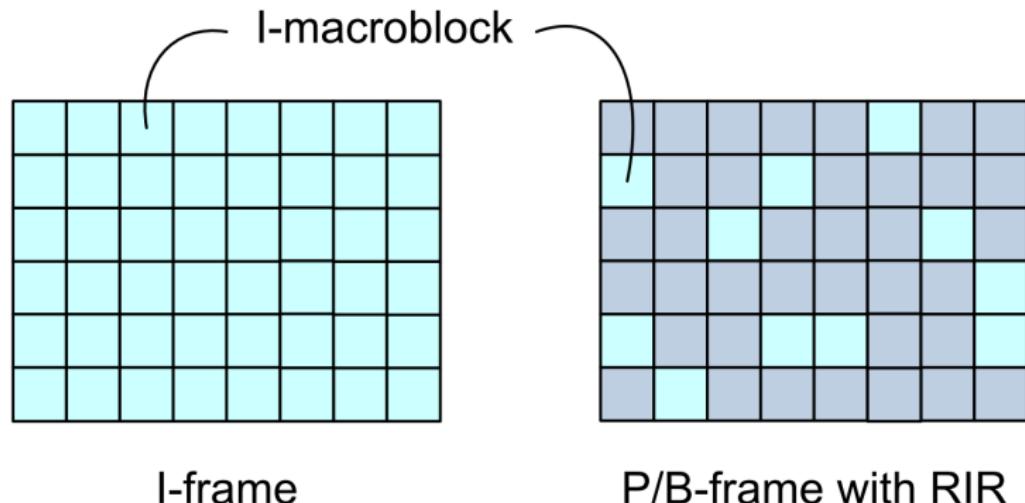
Избыточные сегменты

- H.264/AVC позволяет передать избыточные сегменты декодеру.
- Избыточный сегмент (*redundant slice*) содержит макроблоки, уже переданные в другом сегменте.
- При этом макроблоки в избыточном сегменте могут кодироваться другим способом и предсказываться из других областей, например, из других кадров.
- Это увеличивает вероятность успешной доставки сегмента.

5. Передача видео по каналам с потерями пакетов

Периодическое обновление интра блоками

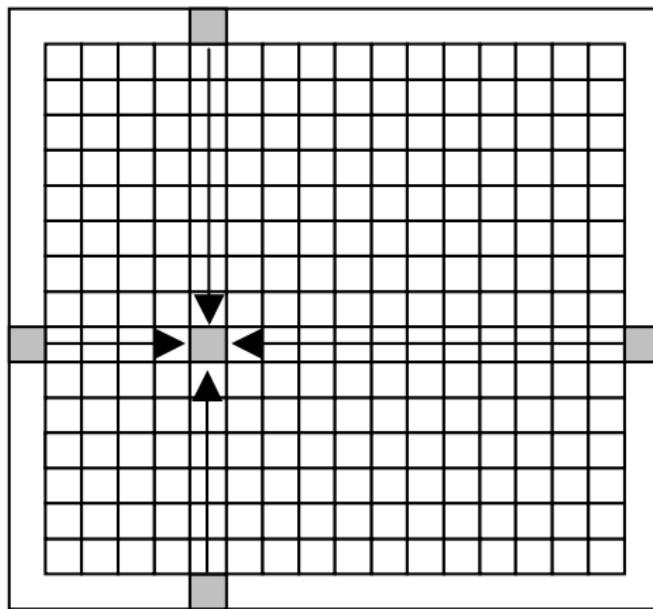
- Распространение искажения, вызванного ошибками может быть остановлено путем включения интра блоков.
- Кодер может периодически кодировать макроблок в режиме интра.



5. Передача видео по каналам с потерями пакетов

Внутрикадровая компенсация искажений в H.264/AVC

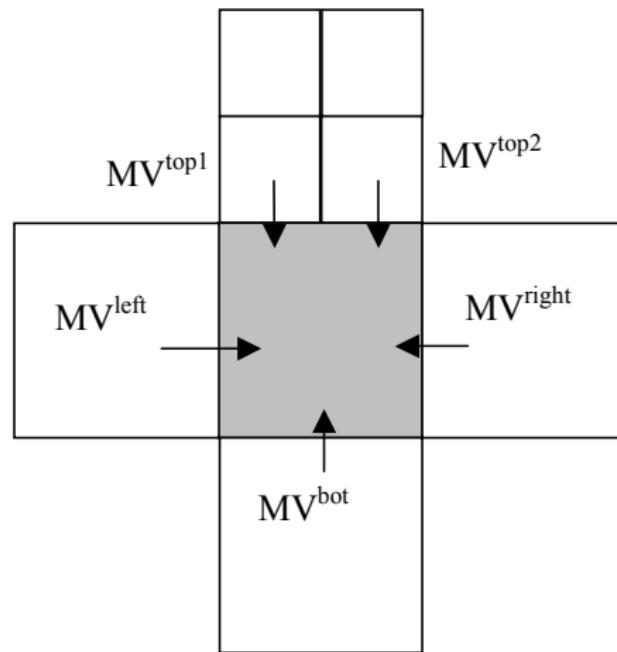
- Недостающие пиксели интерполируются на основе успешно принятых пограничных пикселей.



5. Передача видео по каналам с потерями пакетов

Межкадровая компенсация искажений в H.264/AVC

- Имеет смысл предсказать вектор движения утраченной области по соседним векторам.

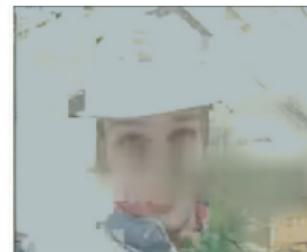


5. Передача видео по каналам с потерями пакетов

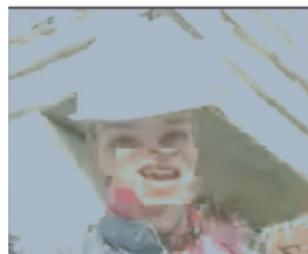
Адаптивная внутри/межкадровая компенсация искажений ⁷



Previous frame
concealment



Spatial error
concealment



Temporal error
concealment



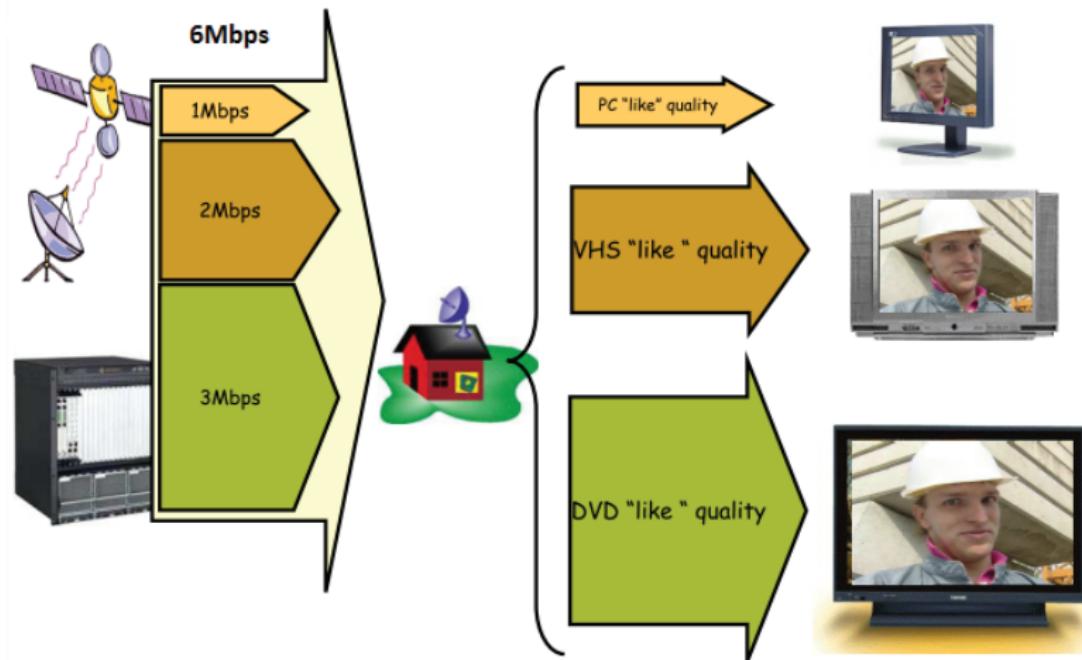
Adaptive error
concealment

⁷YouTube video example <https://www.youtube.com/watch?v=-FLXEOxPUSk>

5. Передача видео по каналам с потерями пакетов

Иерархическое кодирование видеинформации

Кодер формирует несколько уровней битового потока: базовый и уточняемые уровни. Для декодирования очередного уровня требуется принять все предыдущие уровни.



5. Передача видео по каналам с потерями пакетов

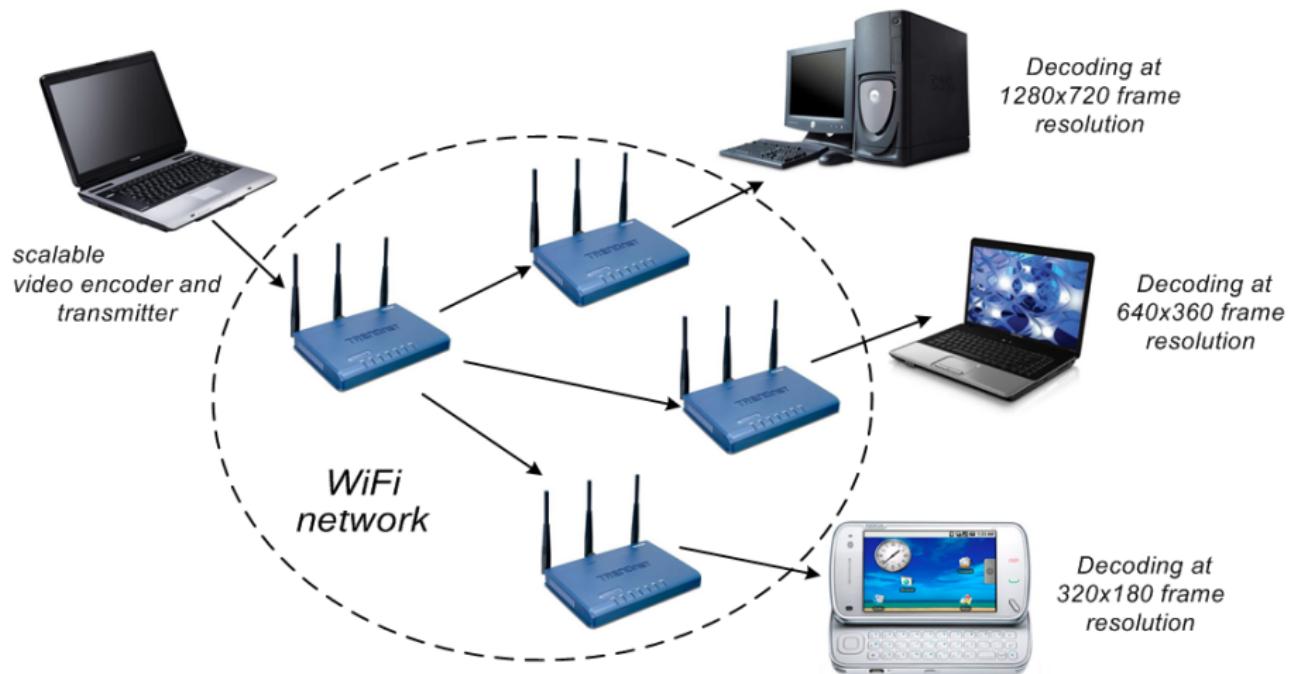
Иерархическое кодирование видеинформации

Виды иерархии:

- Временная иерархия (разные кадровые скорости);
- Пространственная иерархия (разные размеры кадров);
- Иерархия в качестве;
- Комбинированная иерархия.

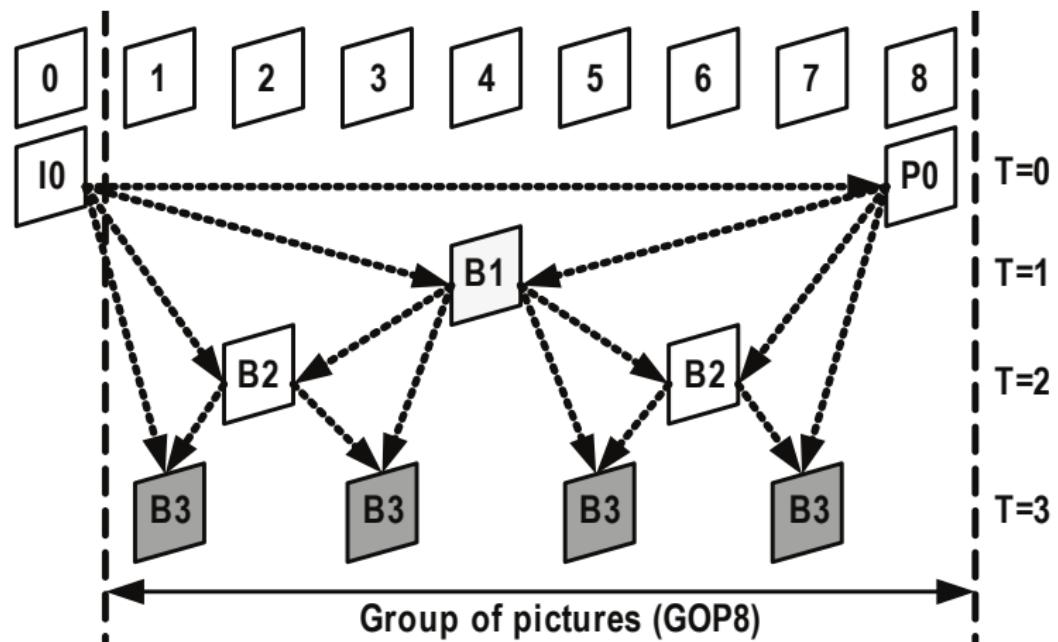
5. Передача видео по каналам с потерями пакетов

Иерархическое кодирование видеинформации



5. Передача видео по каналам с потерями пакетов

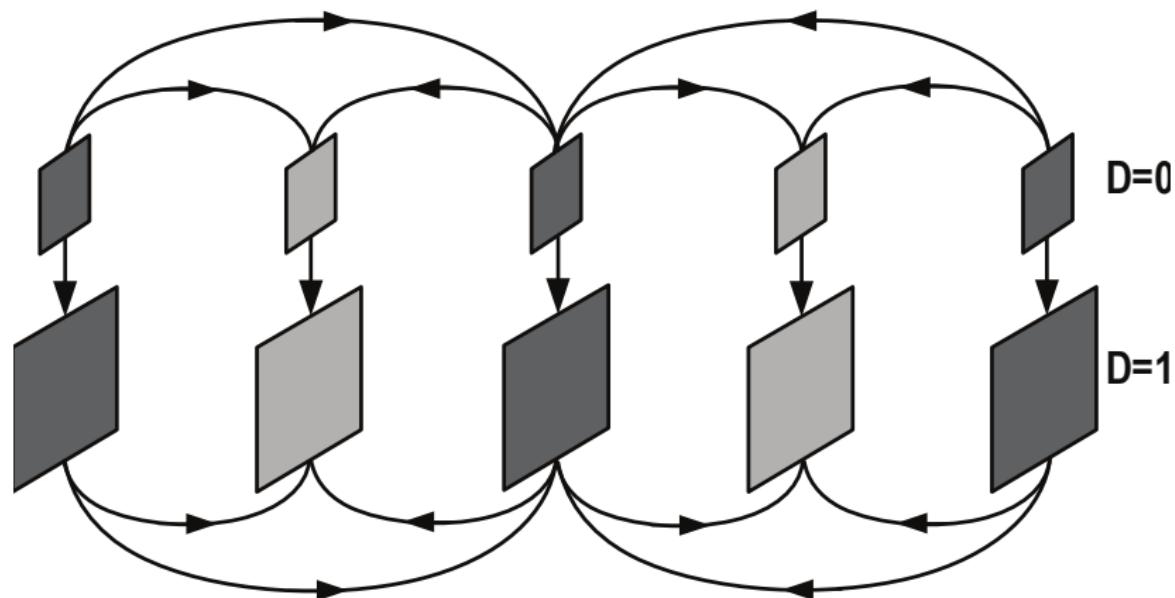
Временная иерархия



Каждый временной уровень (temporal layer) имеет идентификатор T , который начинается с нуля и увеличивается на единицу для каждого следующего уровня.

5. Передача видео по каналам с потерями пакетов

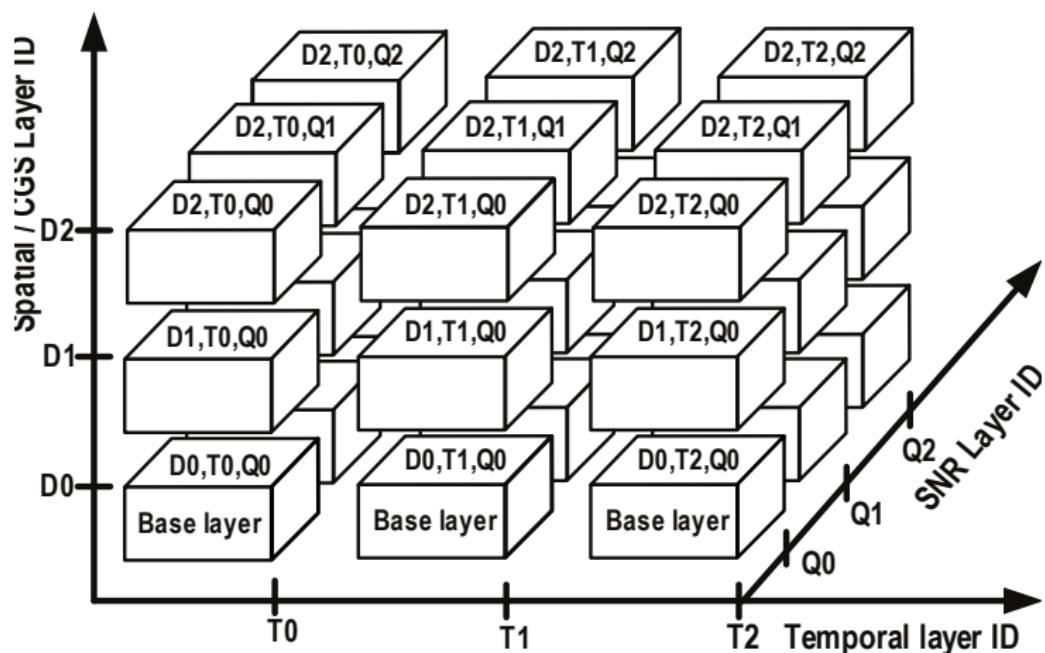
Пространственная иерархия и межуровневое предсказание



Каждый пространственный уровень (spatial layer) имеет идентификатор D , который начинается с нуля и увеличивается на единицу для каждого следующего уровня.

5. Передача видео по каналам с потерями пакетов

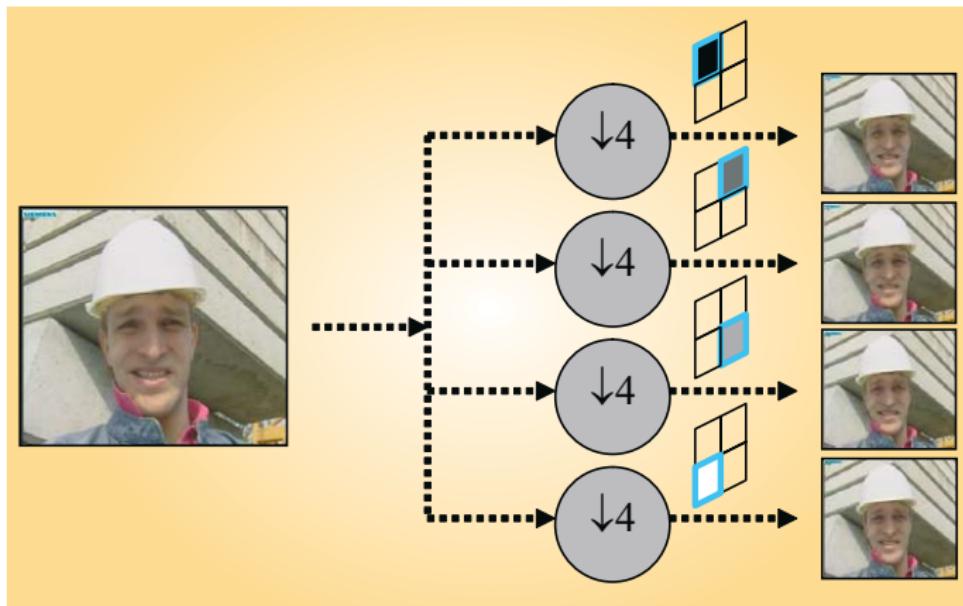
Комбинированная иерархия в H.264/AVC



5. Передача видео по каналам с потерями пакетов

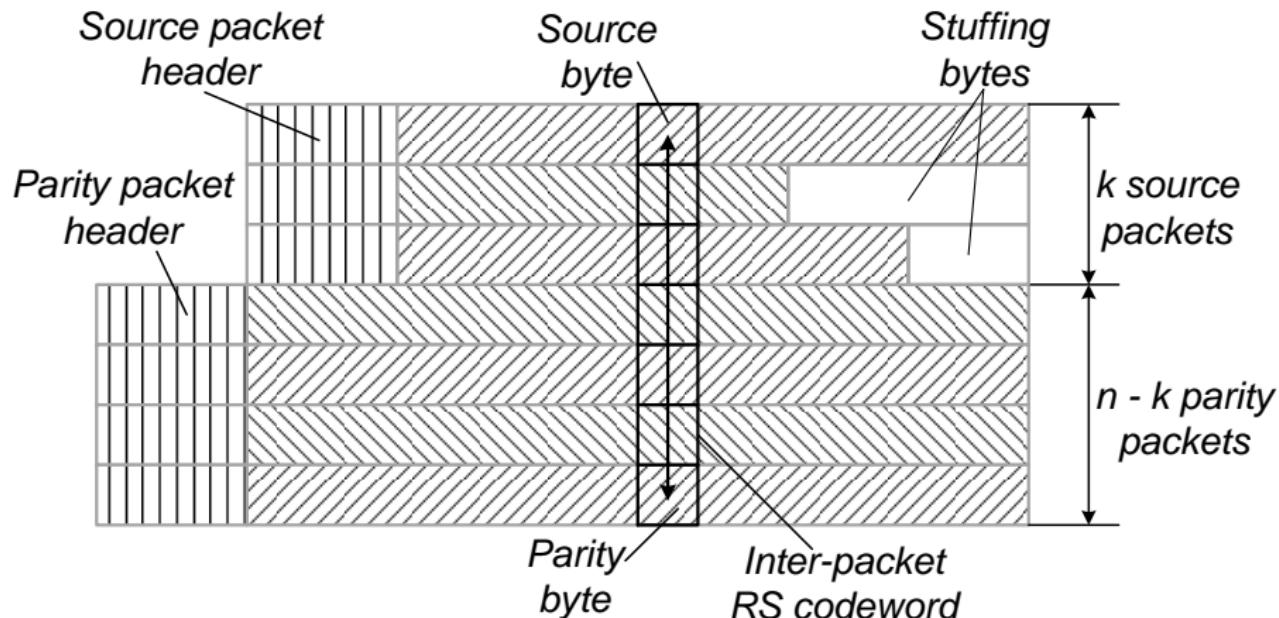
Multiple description coding

- В MDC все уровни имеют одинаковую значимость.
- Чем выше уровень успешно доставлено, тем выше качество.



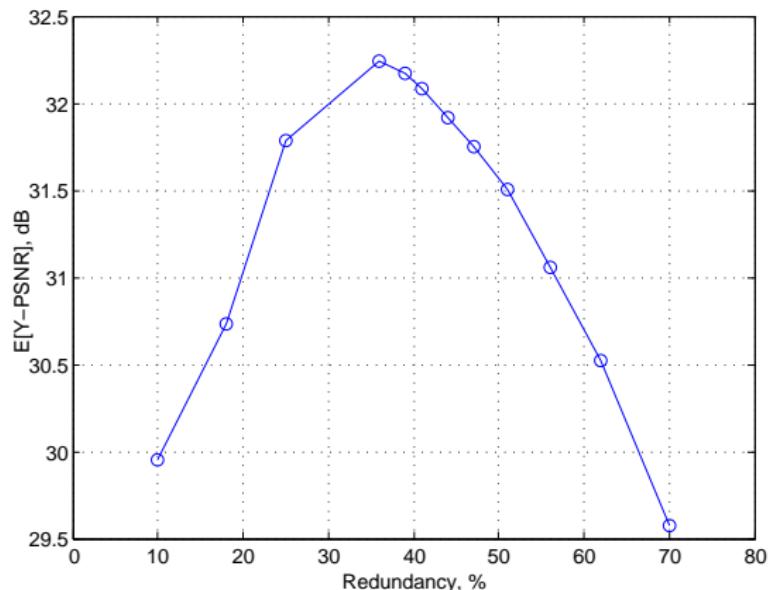
5. Передача видео по каналам с потерями пакетов

Межпакетное кодирование для каналов со стираниями



5. Передача видео по каналам с потерями пакетов

Выбор кода Рида-Соломона при 20% потерь пакетов, 3000 kbps



Режим защиты	1	2	3	...	11	12
Уровень защиты	Четырехкратное повторение	RS (6,2)	RS (7,3)	...	RS (15,11)	Без защиты