

MULTIMEDIÁLNÍ A HYPERMEDIÁLNÍ SYSTÉMY

10)
Komprese videa

Petr Lobaz, 5.5.2015

NEKOMPRIMOVANÉ VIDEO

DATOVÝ TOK SD

1 snímek 625/50	$720 \times 576 \times 3 =$	1,18 MB
1 snímek 525/60	$720 \times 480 \times 3 =$	0,99 MB
1 vteřina 625/50	$25 \times 1,18 =$	29,66 MB
1 vteřina 525/60	$30 \times 0,99 =$	29,66 MB
1 minuta	$1500 \times 1,18 =$	1,73 GB
1 hodina	$90000 \times 1,18 =$	104,28 GB

⇒ datový tok 249 Mbps (HD video 1080p25: 1,55 Gbps)

- při podvzorkování 4:2:0 datový tok 124 Mbps
- datový tok CD 1,5 Mbps, DVD 11 Mbps, Blu-ray Disc 40 Mbps

⇒ komprese videa je obvykle nezbytná

KOMPRESI VIDEO

POŽADAVKY

- kontrola toku dat (zaručený kompresní poměr)
- rychlost komprese/dekomprese
 - dekomprese musí obvykle být v reálném čase i na relativně slabém hardwaru
 - komprese v reálném čase je nutná pro přímé přenosy (studiová: silný hardware; videokonference: slabý hardware)
- odolnost vůči chybám přenosu – jedna chyba smí znehodnotit jen malou část videa
- musí umožňovat mechanismus pro synchronizaci se zvukem (obvykle řeší systémová vrstva – kontejner)

KOMPRESI VIDEO

TYPY POUŽITÍ

- pro jednosměrný přenos (např. televize)
 - odolnost vůči chybám, škálovatelnost
 - MPEG-2, Windows Media Video, H.264, H.265, WebM
- obousměrný přenos (např. videokonference)
 - realtime komprese/dekomprese
 - H.264, MPEG-4 Video
- archivace (např. DVD, Blu-ray)
 - dobrý kompresní poměr
 - MPEG-2, H.264, VC-1, H.265
- dočasný formát (např. střih)
 - náhodný přístup do souboru, minimální ztráta
 - MJPEG, AVC-Intra, Apple ProRes, DNxHD (VC-3)

KOMPRESI VIDEO

CODEC

- compressor/decompressor
- typicky tři typy
 - video
 - audio
- systém: kontejnerová struktura, která řeší uložení elementárních mediálních proudů + mechanismus jejich synchronizace
- systémový typ se spíše než pojmem codec označuje jako muxer / splitter (nebo multiplexor / demultiplexor)
- pro kódování / dekódování multimediálních dat je třeba zaručit podporu všech zúčastněných kodeků

TYPY KOMPRESI

BEZZTRÁTOVÁ

- samostatně minimální použití
 - typicky pro záznam obrazovky (screen capture)
 - archivace lékařských a vojenských dat
- RLE, VLC (Huffmanovo kódování apod.), aritmetické kódování – doplňkové metody nebo nepříliš rozšířená kompresní schémata
- LZW – ve formátu GIF
 - jednoduché internetové animace
 - přes svou zastaralost jde o přenositelný a nenáročný způsob prezentace jednoduchého videa bez zvuku
- bezztrátová DWT – MJPEG2000
- celočíselná obdoba DCT – speciální typ H.264

TYPY KOMPRESSE

ZTRÁTOVÁ

- vector quantization (VQ)
 - rozdělení obrazu na „bloky“ pixelů
 - tvorba tabulky reprezentativních „bloků“
 - místo bloku kódujeme číslo nejpodobnějšího bloku v tabulce
 - potenciálně silná metoda, problémy s efektivní tvorbou tabulky a jejím uchováním
 - při jednoduché implementaci velmi rychlá (nenáročná) dekomprese
 - dnes se prakticky nevyužívá (ale v budoucnu to může být jinak)
 - historie: Intel Indeo 3.2, Cinepak, Sorenson Video 1

TYPY KOMPRESSE

- rozdělení obrazu na bloky + diskrétní kosinová nebo obdobná transformace + kvantizace koeficientů
 - princip obdobný JPEG
 - dnes zdaleka nejvyužívanější metoda
 - MJPEG, DV, H.261–5, MPEGx, VPx, ...
- diskrétní waveletová transformace + kvantizace koeficientů
 - princip obdobný JPEG2000
 - MJPEG2000 – de facto sekvence snímků JPEG2000
 - Redcode (a jiné RAW formáty profesionálních kamer)
 - Digital Cinema System (distribuce filmů do kin)

PRINCIP KOMPRESSE

ODSTRANĚNÍ REDUNDANCE (DEKORELACE)

- intra kódování
 - odstranění prostorové (spatial) redundance
 - typický obraz ve videu je rozmazaný pohybem, je místy ostrý a místy neostrý
 - principy stejné jako u komprese statického obrazu
- inter kódování
 - odstranění časové (temporal) redundance
 - typické po sobě jdoucí snímky jsou téměř stejné
 - po odstranění časové redundance se snímek nejčastěji dále podrobuje odstranění prostorové redundance
- při kódování snímků je navíc nutné zařídit, aby kvalita po sobě jdoucích snímků byla srovnatelná

INTRA KÓDOVÁNÍ

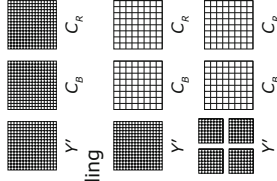
INTRA KÓDOVÁNÍ

- stejné jako komprese statického obrazu
- výhoda: jednoduchost, náhodný přístup do videa
 - ⇒ využití pro střih, postprodukci
- nevýhoda: velký datový tok
- parametr „ztrátovosti“ lze dynamicky snímek po snímku měnit ⇒ datový tok konstantní za jednotku času
 - čím je datový tok variabilnější, tím větší musí být vyrovnávací paměť pro záznam/přehrávání
- někdy je zapotřebí velmi stabilní datový tok
 - obvykle: konstantní velikost každého snímku
 - ještě přísněji: konstantní velikost části snímku

INTRA KÓDOVÁNÍ

ZÁKLADNÍ POSTUP

- převod obrazu do $Y' C_B C_R$
- rozdělení obrazu na makrobloky (MB)
 - příklad: 16×16 pixelů
- aplikace zvoleného typu chroma subsampling
 - příklad: po 4:2:0 vznikne 16×16 hodnot Y' , 8×8 hodnot C_B , 8×8 hodnot C_R
- rozdělení makrobloku na bloky
 - příklad: dělení na bloky 8×8 hodnot, vzniknou 4 bloky Y' , 1 blok C_B , 1 blok C_R
 - aby dělení na bloky vyšlo pěkně, musí být tvar makrobloku kompatibilní s typem chroma subsampling



INTRA KÓDOVÁNÍ

- aplikace DCT 8×8 vzorků na jednotlivé bloky
- kvantizace koeficientů
 - pro Y' typicky jiná kvantizační tabulka než pro C_B a C_R
 - kvantizační tabulka se typicky mění mezi snímky i v rámci snímku
- převod bloků do 1D proudu dat
- aplikace bezztrátové kompresní metody, typicky VLC (variable length code) – Huffmanovo kódování, aritmetické kódování

INTRA KÓDOVÁNÍ

KONSTANTNÍ DATOVÝ TOK

- nejjednodušší řízení: každý snímek má být průměrně dlouhý S bitů
 - je-li delší, pro další snímek se kvantizace „zhorší“
 - je-li kratší, pro další snímek se kvantizace „zlepší“⇒ datový tok je pak průměrně konstantní, kvůli střihu nelze vyloučit prudkou změnu
- kvůli zamezení skokové změny kvality se obvykle definuje, jak se smí kvantizace mezi snímky maximálně změnit

INTRA KÓDOVÁNÍ

KONSTANTNÍ DATOVÝ TOK

- lepší řízení: každý makroblok má být průměrně dlouhý M bitů ⇒ stejný princip jako výše aplikovaný na makrobloky
 - nevýhoda: typický obraz má složitě (členitě) i jednoduché (např. jednobarevné) makrobloky ⇒ není moc chytré požadovat konstantní délku makrobloku
 - řešení: je-li makroblok delší než M bitů; uloží se přebývající bity k následujícímu makrobloku
 - nevýhoda: makrobloky vedle sebe mají typicky podobnou složitost
 - řešení: přechod makrobloky v pseudonáhodném pořadí + průběžné řízení kvantizace

INTRA KÓDOVÁNÍ

- nevýhody posledního řešení
 - při pseudonáhodném průchodu makrobloky kodér neví, jak složitý makroblok má v dalším kroku očekávat
 - vzniká značně složitá struktura umístění bitů v makroblocích
- finální řešení:
 - dělení obrazu na superbloky (SB, např. 9×3 makrobloky)
 - rozdělení SB na makrobloky (MB): $SB, MB_1, SB, MB_2, \dots$
 - v prvním průchodu se zpracuje první MB z každého SB, pořadí SB pseudonáhodné
 - v druhém průchodu se zpracuje druhý MB z každého SB
 - ...

INTRA KÓDOVÁNÍ

PROKLÁDANÝ OBRAZ

- kódování po půlsnímích nevýhodné, je-li obraz statický (protože půlsnímky jsou si značně podobné)
- kódování po snímcích nevýhodné, je-li obraz dynamický (protože snímek složený z půlsnímků má „zoubkované“ okraje objektů)
- řešení:
 - pro každý MB snímku rozhodnout, je-li statický/ dynamický (resp. jestli obsahuje „zoubkované“ okraje)
 - statický MB kódovat normálně
 - dynamický MB rozdělit na sudé/liché řádky, kódovat je odděleně, nebo kódovat jejich součet a rozdíl

INTRA KÓDOVÁNÍ

PREDIKCE V RÁMCI OBRAZU

- predikce DC koeficientu bloku – lze jej ukládat diferenciálně oproti předchozímu (jako v JPEG)
- predikce vzhledu bloku na základě okolí (H.264 apod.): v okamžiku dekodování bloku jsou již dekodované bloky vlevo a nad aktuálním; lze ukládat jen rozdíly pixelů oproti pixelům odhadnutým z okolních pixelů



pixely bloku, podobné příměrné pixelů okolí

pixely bloku, podobné příměrné pixelů okolí

pixely bloku, podobné příměrné pixelů okolí

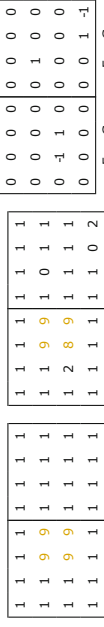
pixelů okolí (Jiné, než jsou na obrázku)

pro některé úhly, a polohy šipek, aby bloky obsahovaly informace o odhadu interpolací z okolních pixelů

INTER KÓDOVÁNÍ

INTER KÓDOVÁNÍ

- po sobě jdoucí snímky F, G jsou si podobné ⇒ využití rozdílového kódování
- typicky se řeší po makroblocích – velikost stejná jako u intra kódování
- místo makrobloku G_n , kódujeme $F_n - G_n$ (rozdíly hodnot pixelů), typicky pomocí DCT



F_1
snímek F rozdělený na makrobloky F_1 a F_2

G_1
snímek G (kvůli šumu není identický se snímkem F)

$F_2 - G_2$
rozdílové makrobloky $F_2 - G_2$, obsahují malá čísla ⇒ výhodnější pro kódování

INTER KÓDOVÁNÍ

- předchozí postup výhodný u statické scény
- nevýhodný, došlo-li k pohybu (hodnoty $F_n - G_n$ velké)

snímek F	snímek G (kvůli šumu a pohybu není identický s F)	rozdílový makroblok $F_n - G_n$ obsahuje velká čísla => nevhodný pro kódování																																																																																																								
<table border="1"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>9</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>9</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>9</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>9</td><td>8</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>2</td></tr> </table>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	0	1	1	1	1	9	8	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	2	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>8</td><td>0</td><td>8</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>8</td><td>1</td><td>7</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>-1</td></tr> </table>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	8	0	1	0	0	0	8	1	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1
1	1	1	1	1	1	1	1																																																																																																			
1	1	9	1	1	1	1	1																																																																																																			
1	1	9	1	1	1	1	1																																																																																																			
1	1	1	1	1	1	1	1																																																																																																			
1	1	1	1	1	1	1	1																																																																																																			
1	1	1	1	1	1	1	1																																																																																																			
1	9	1	1	0	1	1	1																																																																																																			
1	9	8	2	1	1	1	1																																																																																																			
1	1	1	1	1	1	0	2																																																																																																			
0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																			
0	8	0	8	0	1	0	0																																																																																																			
0	8	1	7	0	0	0	0																																																																																																			
0	0	0	0	0	0	1	-1																																																																																																			

INTER KÓDOVÁNÍ

- řešení: pro výpočet rozdílového makrobloku ke kódování G_n nepoužijeme makroblok F_n , ale jinou část snímku F (označíme ji F_n^{MV})
- motion compensation – nalezení motion vektoru MV, který minimalizuje $F_n^{MV} - G_n$

snímek F čárkovaně naznačen F_n^{MV}	snímek G (kvůli šumu a pohybu není identický s F)	rozdílový makroblok $F_n^{MV} - G_n$ obsahuje malá čísla => vhodný pro kódování																																																																																																								
<table border="1"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>9</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>9</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>9</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>9</td><td>8</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>2</td></tr> </table>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9	1	1	0	1	1	1	1	9	8	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	2	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>-1</td></tr> </table>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1
1	1	1	1	1	1	1	1																																																																																																			
1	1	9	1	1	1	1	1																																																																																																			
1	1	9	1	1	1	1	1																																																																																																			
1	1	1	1	1	1	1	1																																																																																																			
1	1	1	1	1	1	1	1																																																																																																			
1	1	1	1	1	1	1	1																																																																																																			
1	9	1	1	0	1	1	1																																																																																																			
1	9	8	2	1	1	1	1																																																																																																			
1	1	1	1	1	1	0	2																																																																																																			
0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																			
0	0	0	0	1	0	0	0																																																																																																			
0	0	1	0	0	0	0	0																																																																																																			
0	0	0	0	0	0	1	-1																																																																																																			

INTER KÓDOVÁNÍ

NÁVAZNOST NA DEKOMPRESOR

1. dekompressor rekonstruuje snímek F
 2. po přijetí rozdílových makrobloků ($F_n^{MV} - G_n$) a motion vektorů rekonstruuje makrobloky snímku G:
 $G_n = F_n^{MV} - (F_n^{MV} - G_n)$
- *takto to ale nefunguje!*
 - bloky ztrátově uložené (tj. poškozené kompresí) ⇒ dekompressor zná jen poškozené makrobloky zF_n a $z(F_n^{MV} - G_n)$
 - ⇒ rekonstrukce G_n nesmyslná:
 $G_n = zF_n^{MV} - z(F_n^{MV} - G_n) = ?$
 - ⇒ dekompressor nemůže rekonstruovat zG , protože nezná F
 - na stejný problém jsme narazili u kódování zvuku DPCM (viz přednáška 5)

INTER KÓDOVÁNÍ

- řešení: kompressor obsahuje i dekompressor
- postup kompresoru:
 - ztrátově uložení snímku F, odeslání na výstup
 - okamžitá dekomprese ⇒ kompresor zná zF (tj. to, co bude znát i dekompressor)
 - kódování snímku G pomocí rozdílových makrobloků $zF_n^{MV} - G_n$, odeslání na výstup
 - (tj. motion compensation probíhá proti snímku zF)
 - okamžitá dekomprese ⇒ kompresor zná zG
 - kódování snímku H pomocí rozdílových makrobloků $zG_n^{MV} - H_n$, odeslání na výstup
 - ...
- ⇒ kompresor i dekompressor musí obsahovat paměť pro „předchozí snímek“

MOTION COMPENSATION

MOTION COMPENSATION

- časově nejnáročnější část komprese
- neslouží k identifikaci pohybu, ale k minimalizaci velikosti zakódovaného rozdílového makrobloku
- na výstup se odesílá rozdílový makroblok + nejlepší nalezený motion vektor
- kvalitnější motion compensation
 - ⇒ menší rozdílový snímek ⇒ lepší kompresní poměr
 - na druhou stranu:
 - „kvalitnější“ motion compensation typicky prohledává více kandidátů na „nejlepší motion vektor“
 - ⇒ pro uložení MV bude třeba více bitů
 - ⇒ zhoršení kompresního poměru
 - ⇒ vyladění motion compensation je poměrně náročné

MOTION COMPENSATION

- základní algoritmus: prohledání všech MV z intervalu $(-X_{\max}, -Y_{\max})$ až $(+X_{\max}, +Y_{\max})$
- např. pro $X_{\max} = Y_{\max} = 16$ je třeba najít nejlepší MV z $(16 + 16 + 1) \times (16 + 16 + 1) = 1089$ kandidátů
- informace o tom, který MV byl vybrán, zabere 11 bitů
- volba $X_{\max} = Y_{\max} = 16$ je relativně vhodná pro video s minimem pohybu, např. videokonferenci, pro obecné video (např. film) je rozsah prohledávání malý
 - ⇒ větší časová náročnost, větší náročnost uložení MV (např. H.264 používá $X_{\max} = 2048$)
- pro $X_{\max} = Y_{\max} = 1024$ by bylo třeba prohledat 4 198 401 kandidátů, informace o vybraném MV by zabírala 23 bitů srovnaj: typický blok v JPEG zabere cca 64 bitů

MOTION COMPENSATION

URÝCHLENÍ A VYLEPŠENÍ

- hledá se MV, který pravděpodobně povede ke krátkému kódu rozdílového makrobloku R (velikosti $M \times N$ vzorků)
 - ideální MV vede na nulový rozdílový makroblok (v praktických situacích takový MV neexistuje)
 - dobrý MV vede na rozdílový makroblok s „malými čísly“
 - existují různá kritéria, nedá se říct, že jedno je lepší než druhé:

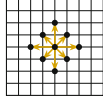
$$MAD = \frac{1}{MN} \sum_i \sum_j |R[i, j]| \quad (\text{mean absolute difference})$$

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_i \sum_j (R[i, j])^2 \quad (\text{mean squared error})$$

- snaha o nalezení R s minimální hodnotou kritéria

MOTION COMPENSATION

- předpoklad: pro jistý MV je hodnota kritéria minimální, čím je MV odlišnější, tím je hodnota kritéria vyšší
 \Rightarrow hledání minima funkce přes povolený rozsah MV
- základní urychlení motion compensation:
 1. výpočet kritéria pro $MV = (0,0)$
a několik okolních MV
(příklad: „diamond search“)
 2. výběr MV, kde bylo kritérium nejmenší, „posun středu vyhledávání“, pokračování v hledání od nového středu
 3. jakmile je kritérium nejmenší „uprostřed“, prohlédání všech zbývajících těsně sousedících MV



MOTION COMPENSATION

- další urychlení: dá se předpokládat, že hodnota kritéria se spojitě mění \Rightarrow interpolací či extrapolací hodnoty kritéria se dá odhadnout, kde pokračovat v hledání
- další urychlení:
 1. tvorba variant snímků F, G s $1/2$ a $1/4$ rozlišením
 2. motion compensation na snímcích s $1/4$ rozlišením \Rightarrow nejlepší nalezené MV jsou kandidáti na optimum (pokud má makroblok v plném rozlišení 16×16 vzorků, má nyní jen 4×4 vzorky, tj. výpočet kritéria je $16 \times$ rychlejší, rozsah MV je $16 \times$ menší)
 3. motion compensation na snímcích s $1/2$ rozlišením, hledá se jen v těsném okolí kandidátů z kroku 2
 4. motion compensation na snímcích s plným rozlišením, hledá se jen v těsném okolí kandidátů z kroku 3

MOTION COMPENSATION

- vylepšení – lze pokračovat krokem 5:
 - 5a) výpočet, jak by vypadal předchozí snímek (F) posunutý o $1/2$ pixelu nahoru, doprava, šikmo doprava
 - 5b) motion compensation mezi aktuálním snímkem (G) a posunutými verzemi snímku F, hledá se jen v okolí kandidátů z kroku 4
- výsledek: MV s přesností $1/2$ pixelu (halfpel)
příklad: ideální MV je $(-5, 12)$ proti obrázku posunutému o $1/2$ pixelu nahoru \Rightarrow MV je $(-5, 12.5)$
- další vylepšení: výpočet, jak by vypadal snímek F posunutý o vektory $(\pm 1/4, 0)$, $(0, \pm 1/4)$, $(\pm 1/4, \pm 1/4)$
 \Rightarrow MV s přesností $1/4$ pixelu (qpel)
- některé kodéry pokračují i na $1/8$ pixelu



MOTION COMPENSATION

- se zvyšující se přesností MV stále roste počet bitů nutných k jeho uložení, ale:
 - MV je typicky podobný MV okolních makrobloků
 - MV makrobloku je typicky podobný MV téhož makrobloku z předchozího snímku
- důsledky:
 - MV se může odhadnout z okolních MV, které bude mít dokodér k dispozici, a ukládat pouze rozdíl
 - při motion compensation jsou první kandidáti na optimální MV odhadnuti z MV okolních makrobloků

MOTION COMPENSATION

- další urychlení:
 - motion compensation probíhá jen na luma vzorcích (Y'), pro chroma vzorky se použije stejný MV
 - vodorovné pohyby jsou častější ⇒ redukce rozsahu MV ve svislém směru
 - použití stejného MV pro všechny bloky makrobloku
 - moderní kodeky je obvykle nevyužívají, tj.:
 - mohou hledat MV pro luma a chroma vzorky zvlášť
 - v případě potřeby má každý blok svůj MV
 - je-li to vhodné, může se makroblok hierarchicky dělit na subbloky (typicky až do velikosti 4x4 vzorky), každý subblok může mít svůj MV
- ⇒ lepší kompresní poměr, ale výpočetně mnohem náročnější

MOTION COMPENSATION

- přes všechnu snahu se může stát, že „optimální MV“ vede k příliš velkému rozdílovému makrobloku
 ⇒ potom je výhodnější blok uložit „normálně“, tj. bez predikce
 - typicky, pokud se náhle změnil obraz (střih) nebo se do snímku pohybem dostal nový objekt

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	0	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

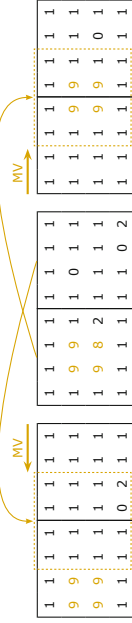
snímek F

k makrobloku G₁ nelze najít vhodný MV do snímku F

OBOUSMĚRNÉ KÓDOVÁNÍ

OBOUSMĚRNÉ KÓDOVÁNÍ

- řešení: makroblok snímku G může být kódovaný rozdílově oproti snímku H (následujícímu po G)



snímek F

čárkovaně naznačen F₁^{MV}

makroblok G₁ se bude kódovat s MV do snímku H₁

G₂ s MV do snímku F

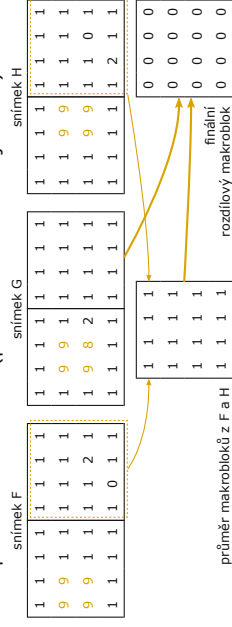
snímek H

čárkovaně naznačen H₁^{MV}

- jak je vidět na příkladu makrobloku G₂, motion vektor vůbec nemusí souviset s pohybem!

OBOUSMĚRNÉ KÓDOVÁNÍ

- makroblok může být kódovaný
 - „normálně“, rozdílově proti makrobloku z předchozího nebo z následujícího snímku
 - rozdílově proti průměru makrobloků z následujícího a předchozího snímku (průměrem se redukuje šum!)



KÓDOVÁNÍ SNÍMKŮ

- standardní názvosloví:
 - I snímek: všechny makrobloky jsou uloženy „normálně“
 - P snímek: makrobloky uloženy buď „normálně“, nebo rozdílově oproti předchozímu snímku; typicky 3x menší než I snímek
 - B snímek: makrobloky uloženy buď „normálně“, nebo rozdílově oproti předchozímu/následujícímu snímku nebo průměru makrobloků; typicky 3x menší než P snímek
- značení X_i – snímek č. i je typu X
- příklad sekvence snímků: $I_0, B_1, P_2, B_3, P_4, B_5, P_6, B_7, I_8, P_9, B_{10}, I_{11}, P_{12}, \dots$
- problém: jak zařadit, aby po sobě jdoucí snímky P/B nezávisely cyklicky jeden na druhém?

KÓDOVÁNÍ SNÍMKŮ

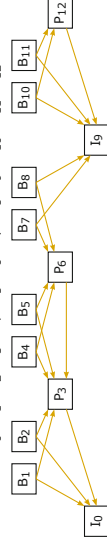
(ZPĚTNÉ) PREDIKTIVNÍ KÓDOVÁNÍ

- nevyužívá B snímky \Rightarrow nemohou vzniknout cykly, kodér a dekodér jsou jednodušší
- sekvence $I_0, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, \dots$
- výhoda: neustálé vylepšování kvality (statického) obrazu
 - snímek I_0 je uložen ztrátově; P_1 ztrátu trochu opravi atd.
- v případě chyby poškozen zbytek videa
- nemožnost náhodného přístupu do videa
- nemožnost rozdělit video (není zaručeno, že snímek n půjde zakódovat jako I_n v přesně stejné kvalitě)
- částečné řešení: vynucené vkládání snímku bez predikce – např. sekvence $I_0, P_1, P_2, P_3, \dots, P_{24}, P_{25}, P_{26}, P_{27}, \dots$

KÓDOVÁNÍ SNÍMKŮ

OBOUSMĚRNÉ PREDIKTIVNÍ KÓDOVÁNÍ

- využívání B snímků, ale
 - P snímek může záviset jen na předchozím I/P snímku
 - B snímek může záviset jen na okolním I/P snímku
- sekvence $I_0, B_1, B_2, P_3, B_4, B_5, P_6, B_7, B_8, I_9, B_{10}, B_{11}, P_{12}, \dots$



příklad diagramu závislosti snímků

- nevýhoda: dekodér musí v paměti držet snímky $B_1, B_2,$ dokud nepřijme snímek $P_3 \Rightarrow$ až pak může dekódovat a zobrazovat \Rightarrow dekodér musí mít velkou vyrovnávací paměť

KÓDOVÁNÍ SNÍMKŮ

- řešení: kodér ukládá snímky v takovém pořadí, aby je dekodér mohl okamžitě dekódovat
- dekodér musí obsahovat pouze vyrovnávací paměti pro předchozí (F) a následující (H) snímek
- ke každému snímku musí být přiložena časová značka t , kdy se má snímek zobrazit
- příklad vstupu: I_0 P_3 B_1 B_2 P_6 B_4 B_5 I_9 B_7 B_8 P_{12} B_{10} B_{11} ...
činnost dekodéru:

I_0 dekódovat, uložit do F, zobrazit v čase $t = 0$

P_3 dekódovat, uložit do H, napláňovat zobrazení na $t = 3$

B_1 dekódovat, neukládat, zobrazit v čase $t = 1$

B_2 dekódovat, neukládat, zobrazit v čase $t = 2$

– zobrazit H podle plánu v čase $t = 3$, přesunout H do F

P_6 dekódovat, uložit do H, napláňovat zobrazení na $t = 6$

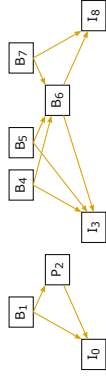
KÓDOVÁNÍ SNÍMKŮ

- nevýhody sekvence I_0 B_1 B_2 B_3 B_4 B_5 ... B_{N-1} I_N ...
 - kodér nemůže zakódovat B_{t-1} , dokud nezakóduje I_N
⇒ velké zpoždění, problém u přímého přenosu
 - sekvence BBBB... nezvyšuje kvalitu obrazu
(na rozdíl od sekvence PPPP...)
 - pokud I_0 a I_N zobrazují stejnou scénu s různým jasem
(např. plynule se změnilo osvětlení scény), potom B snímky z prostředka sekvence nenajdou vhodný MV ani do I_0 , ani do I_N
- B snímky jsou ale typicky krátké ⇒ je vhodné hledat řešení

KÓDOVÁNÍ SNÍMKŮ

VYLEPŠENÉ OBOUSMĚRNÉ PREDIKTIVNÍ KÓDOVÁNÍ

- u klasického obousměrného kódování nesmí B snímek záviset na jiném B snímku – zbytečné omezení řešení (H.264 aj.): B snímek smí záviset na jiném B snímku, ale závislosti se nesmí zacyklit



příklad diagramu závislosti snímků

- uložení: $I_0, P_2, B_1, I_3, B_6, B_4, B_5, B_7, \dots$

KÓDOVÁNÍ SNÍMKŮ

- další vylepšení:
 - standardní B snímek mohl záviset na aritmetickém průměru z makrobloků $Z_{F_n}^{MV}$ a $Z_{H_n}^{MV}$, tj. na $0,5 Z_{F_n}^{MV} + 0,5 Z_{H_n}^{MV}$
 - uprostřed sekvence B snímků je lepší vážený průměr: $\omega Z_{F_n}^{MV} + (1 - \omega) Z_{H_n}^{MV}$ pro $0 < \omega < 1$

KÓDOVÁNÍ SNÍMKŮ

GOP (GROUP OF PICTURES)

- samostatně dekódovatelná sekvence na sobě závislých snímků (např. od I do I snímků)
 - problém: sekvence $I_0, B_1, B_2, P_3, B_4, B_5, P_6, B_7, B_8, I_9, B_{10}, P_{12}, \dots$ nelze jednoduše rozdělit (GOP vyznačen žlutě)
 - řešení 1: closed GOP
 - GOP ukončen P snímkem:
 $I_0, B_1, B_2, P_3, B_4, B_5, P_6, I_7, B_8, B_9, P_{10}, \dots$
 - lze bez problémů dělit na hranici GOP
 - řešení 2: krátký GOP
 - snadný hrubý střih (např. vložení reklamy do pořadu)
 - řešení 2: krátký GOP
 - sekvence $I_0, B_1, I_2, B_3, I_4, B_5, \dots$
 - při rozdělení snadný přepočet B snímků
- ⇒ relativně snadný přesný střih (studiová práce)

KÓDOVÁNÍ SNÍMKŮ

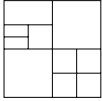
STRUKTURA GOP

- stálá
 - implementačně jednoduché, relativně výhodné pro samostatné záběry
 - typicky zadána délkou GOP (typicky 1–30) a délkou sekvence B snímků (typicky 1–3)
 - algoritmus se i tak musí vypořádat se situací typu „záblesk světla“ (tj. snímek je najednou přesvětlený) proměnná
 - nutná pro pořad se střihy
 - obtížnější implementace
 - komprese často víceprůchodová
- (1. průchod: analýza, 2. průchod: samotná komprese)

KÓDOVÁNÍ SNÍMKŮ

- krátký GOP
 - horší kompresní poměr
 - rychlejší náhodný přístup k jednotlivým snímkům⇒ výhodnější pro studiovou práci, extrém: GOP délky 1 (tj. všechny snímky jsou typu I)
- dlouhý GOP (typicky desítky až stovky snímků)
 - opačné vlastnosti než krátký GOP
 - typické pro koncovou distribuci
 - délka GOP se nesmí přehnat: poškozování jednoho snímku může ovlivnit celý GOP⇒ přepínání mezi TV stanicemi trvá moc dlouho
- ⇒ jednou za čas je vhodné vynutit I snímek i na úkor sníženého kompresního poměru

DALŠÍ POSTUPY

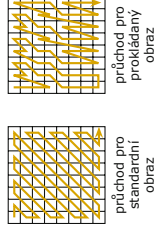
- dynamická volba velikosti bloku: typicky 4 x 4 až 32 x 32 px
 - malý blok: přesnější motion compensation, lepší pro členitou část obrazu
 - velký blok: lepší komprese ploché části obrazu
- 
- bloky (jednotky DCT) vznikají dělením MB na poloviny nebo čtvrtiny
 - bloky mohou sdílet společný MV, nebo má každý blok svůj
- interpolované motion vektory (MV) – místo jednoho MV pro makroblok se uloží pro každý roh jeden
 - ⇒ každý pixel má vlastní interpolovaný MV
 - motion compensation se může odkazovat na libovolný snímek v GOP

DALŠÍ POSTUPY

- in-loop deblocking
 - artefaktem DCT je viditelná struktura bloků v obrazu
 - při motion compensation se kodér odkazuje na ztrátově uloženou podobu snímku \Rightarrow DCT artefakty zvyšují koeficienty rozdílových makrobloků
 - DCT artefakty lze vizuálně „zahladit“ – deblocking technika se stala velmi populární \Rightarrow proč ji nevyužít?
 - \Rightarrow kodér předpokládá, že dekodér bude deblocking provádět (proto název „in-loop“)
 - při motion compensation se kodér odkazuje na ztrátově uložený a při dekompresi vyhlazený obraz
 - \Rightarrow rozdílové makrobloky vycházejí lepší
- kompresní schéma nesmí klást velký odpor při hardwarové nebo paralelní implementaci

DALŠÍ POSTUPY

- alternativy k DCT s podobnými vlastnostmi, ale založenými na celočíselné aritmetice
- alternativní průchody 2D polem pro převod do 1D proudu
 - výběr podle toho, kde se očekává koncový smluk nul
- do výstupního proudu dat se ukládají kromě kvantizovaných DCT koeficientů také motion vektory, parametry kvantizace, typ snímku / makrobloku / bloku, typ dělení makrobloku, ...
 - \Rightarrow vše se pokud možno kóduje prediktivně (rozdílově)
 - \Rightarrow vše se kóduje Huffmanovým nebo aritmetickým kóděrem



DALŠÍ POSTUPY

ŠKÁLOVATELNOST

- požadavek: mít několik verzí videa různé kvality (rozišení, ztrátovost, snímková frekvence, ...)
 - pro internetovou distribuci prakticky nezbytnost: podle rychlosti stahování se automaticky mění kvalita
- naivní řešení: pro každou kvalitu jedna verze
 - nevýhodné: kvalitnější video musí obsahovat stejné informace jako nekvalitní plus nějaké navíc
- dobré řešení: základní video uloženo v nejhorsí kvalitě, pro lepší kvalitu se do proudu dat doplní chybějící informace
- škálovatelnost je přirozená u kodeků založených na diskretní waveletové transformaci

DALŠÍ POSTUPY

PROFILY / ÚROVNĚ

- požadavek: zařízení by mělo jednoznačně specifikovat, jaké video umí kódovat/dekódovat (zejména v reálném čase)
- požadavek: kompresní schéma by mělo být velmi obecné (nízké i vysoké rozišení, datové toky, 2D/3D obraz, ...)
⇒ nelze pouze tvrdit „zařízení X je umí zpracovat kompresní schéma Y“ – všechna zařízení by musela být výkonná nebo kompresní schéma jen jednoúčelové řešení u současných kompresních schémat:
- – profil: specifikuje, které vlastnosti schématu musí zařízení podporovat (např. 10bitová kvantizace, 3D obraz apod.)
 - úroveň: specifikuje parametry datového toku, které musí zařízení zvládnout (např. rozišení 1920x1080 apod.)

DALŠÍ POSTUPY

PŘÍKLAD: MPEG-2 PROFILY (PROFILES)

- *Simple* – jen I, P snímky, chroma subsampling 4:2:0
- *Main* – simple + navíc B snímky
- *SNR* – main + navíc SNR škálovatelnost (tj. umí uložit video ve špatné kvalitě + data, která kvalitulepší)
- *Spatial* – SNR + navíc škálovatelnost v rozlišení (tj. umí uložit video v nízkém rozlišení + data, která rozlišenílepší)
- *High* – spatial + navíc 4:2:2 chroma subsampling, 11bitové rozlišení DC koeficientu
- *Multiview* – main + více pohledů kamer (např. pro stereoskopii) + škálovatelnost ve snímkové frekvenci

DALŠÍ POSTUPY

PŘÍKLAD: MPEG-2 ÚROVNĚ (LEVELS)

Level	High	High1440	Main	Low
max. rozlišení	1920 × 1152	1440 × 1152	720 × 576	352 × 288
max. fps	60	60	30	30
max. px/s	$62,7 \cdot 10^6$	$47,0 \cdot 10^6$	$10,4 \cdot 10^6$	$3,0 \cdot 10^6$
max. bitrate	80 Mbps	60 Mbps	15 Mbps	4 Mbps

- zařízení pak např. deklaruje kompatibilitu s MPEG-2 Main profile @ High level

JEDNODUCHÝ KODÉR

ZÁKLADNÍ POSTUP

1. vstup: snímky $X_0, X_1, X_2, X_3, \dots$
2. rozhodnutí, které snímky budou I/P/B, změna pořadí snímků na $Y_0, Y_1, Y_2, Y_3, \dots$

příklad:

$Y_0 = X_0/I$ (prvním vstupem do kodéru bude snímek X_0 ,
kódovat se bude jako I)

$Y_1 = X_2/P$ (pak zpracuje kodér snímek X_2 jako typ P)

$Y_2 = X_1/B$

$Y_3 = X_2/B$

...

JEDNODUCHÝ KODÉR

3a) má-li být snímek Y_i typu I:

- rozděl snímek na makrobloky
- proved' chroma subsampling
- rozděl výsledek na bloky
- na každý blok aplikuj DCT
- koeficienty DCT kvantizuj
- kvantizované koeficienty + parametry kvantizace odešli na výstup
- simuluj dekodér, dekodovaný snímek ulož do paměti M (= minulý)

JEDNODUCHÝ KODÉR

3b) má-li být snímek Y_i typu P:

- rozděl snímek na makrobloky + chroma subsampling
- pro každý makroblok se pokus najít ve snímku z paměti M nejpodobnější makroblok (motion compensation)
- podobný makroblok se nepovedlo najít: ulož makroblok stejně jako v I snímku
- podobný makroblok se povedlo najít: vypočítej rozdílový makroblok a ulož jej stejně jako v I snímku (a na výstup přidej navíc motion vektory)

JEDNODUCHÝ KODÉR

- simuluj dekodér
- bude-li Y_{i+1} časově následovat po snímku Y_i , dekodovaný snímek ulož do paměti M
- bude-li snímek Y_{i+1} časově předcházet snímek Y_i , dekodovaný snímek ulož do paměti N (= následující; pokud není prázdná, přesuň napřed její obsah do M)

3c) má-li být snímek Y_i typu B:

- rozděl snímek na makrobloky + chroma subsampling
- pro každý makroblok se pokus najít ve snímku z paměti M a N nejpodobnější makroblok (motion compensation)
- ulož makroblok podobně jako v P snímku (drobná změna: motion compensation je složitější)
- pokud na B snímcích jiný snímek nezávisí, máme hotovo

JEDNODUCHÝ KODÉR

4. zjistí aktuální datový tok (tj. počet bitů posledního snímku)
5. datový tok dobrý \Rightarrow nedělej nic
datový tok špatný \Rightarrow uprav do dalšího snímku parametry kvantizace, aby se datový tok přiblížil požadavkům
6. pokračuj dalším snímkem

BĚŽNÁ KOMPRESNÍ SCHÉMATA

- MPEG-2 Video
 - typicky pro televizní vysílání, DVD, Blu-ray
 - relativně velké datové toky (SDTV kolem 3 Mbit/s, DVD kolem 5 Mbit/s \Rightarrow kompresní poměr cca 1 : 50)
 - relativně jednoduchý kodér/dekodér
- H.264 (= MPEG-4 Advanced Video Coding = AVC)
 - dá se používat prakticky na všechno: distribuční formát, videokonference, interní formát videokamer, ...
 - Blu-ray, satelitní TV, internetové video, ...
 - cca 2x menší datový tok než MPEG-2 při stejné kvalitě
 - výrazně komplikovanější kodér
- VC-1 (= SMPTE 421M, část Windows Media Video = WMV)
 - srovnatelné s H.264

BĚŽNÁ KOMPRESNÍ SCHÉMATA

- **WebM**
 - prosazující se formát fy Google založený na kompresním schématu VP-x (v současnosti VP-9)
 - základní myšlenka: vyvinout algoritmy nezatížené patentovými problémy
 - srovnatelné vlastnosti jako H.264
- **Apple ProRes, DNxHD (= SMPTE VC-3)**
 - jednoduchá kompresní schémata, vysoký datový tok, vysoká kvalita obrazu, nízká výpočetní náročnost
 - pracovní formáty pro studiové zpracování
- **H.265 (= MPEG-H = High Efficiency Video Coding = HEVC)**
 - nastupující formát pro 4K rozlišení
 - očekávaný datový tok 2x menší než H.264

BĚŽNÁ KOMPRESNÍ SCHÉMATA

ROZLIŠUJEME

- kompresní schéma (standard): typicky popisuje jen syntaxi datového toku, neřeší implementaci
 - kodek: implementace kodéru/dekodéru kompatibilního se standardem
 - kvalitní kodek = dobrá motion compensation, dobré řízení datového toku, dobrá rozhodnutí o typu kódování snímku apod. + rychlý běh kódování / dekódování
 - kvalitní kodek bývá podstatně efektivnější než jeho první (vývojová) verze
- ⇒ nově navrhovaná kompresní schémata musí nabídnout takové myšlenky, aby i první verze kodéru mohla soupeřit s vyřazenými kodéry starších standardů