

MULTIMEDIÁLNÍ A HYPERMEDIÁLNÍ SYSTÉMY

7)
Bitmapový obraz 1

Petr Lobaz, 7. 4. 2015

DIGITALIZACE OBRAZU

- vzorkování času (pro kinematografii)
- snímek jistého poměru stran
 - 2D vzorkování plochy snímku
- jednotlivé obrazové body
 - vzorkování spektra světla (vyjádření barvy)
 - kvantizace hodnot
 - simulace chromatické adaptace (vyvážení bílé)
 - simulace vjemu jasu (tone mapping)
- pořadí kroků není striktní, vzájemně se ovlivňují

MHS – Bitmapový obraz 1

2 / 60

POMĚR STRAN OBRAZU

- poměr šířka obrazu : výška obrazu
- ve fotografii dán velikostí snímáče
 - reprodukce tiskem \Rightarrow ořez na libovolný poměr stran
 - zobrazení na displeji \Rightarrow nemusí zabírat celou plochu displeje, displeje jsou rozmanité, ... \Rightarrow ve fotografii není poměr stran snímku příliš kritický
- v kinematografii obvykle požadujeme zaplněnou plochu displeje
 - televizní obrazovky jsou celkem standardizované
 - v kině nejsou požadavky na fixní poměr stran tak striktní, ale jistá standardizace je nutná
- budeme se především zabývat poměrem stran filmového (televizního) obrazu

MHS – Bitmapový obraz 1

3 / 60

POMĚR STRAN OBRAZU

- původní poměr stran němého filmu – **1,33 : 1** (4 : 3)
- po zavedení zvukové stopy změna – **1,37 : 1** (Academy)
- první televizní obrazovky – **1,33 : 1** (4 : 3)
- filmová studia reagovala na konkurenci širokoúhlým obrazem
 - **1,66 : 1**
 - 1,85 : 1** (Widescreen)
 - oříznutí výšky filmového políčka 1,37 : 1 při projekci
 - **2,39 : 1** nebo 2,35 : 1 (Cinemascope)
 - políčko přibližně stejné jako 1,37 : 1, obraz při natáčení horizontálně zmenšen, při projekci opět roztáhnut (*anamorfní záznam*)
 - existovaly i další poměry stran, principy stejné

POMĚR STRAN OBRAZU



1,37 : 1 (*Dracula*, 1931)



1,85 : 1 (*The English Patient*, 1996)



2,39 : 1
(*The Thin Red Line*, 1998)

POMĚR STRAN OBRAZU

- širokoúhlý formát nějakou dobu hledal své opodstatnění ve filmové řeči; příklad vhodného použití „detail + pozadí“
- samotný fakt širokoúhlosti tolik tržeb z kin nepřinesl, naopak poplatky za televizní uvedení rostly
⇒ snaha o širokoúhlý televizor
- současné televizní obrazovky – **1,78 : 1** (16 : 9)
 - jednoduchý vztah k formátu 4 : 3 (= 4 / 3 × 4 / 3)
 - kompromis mezi 4 : 3 a 2,39 : 1
 - skoro stejný poměr stran jako Widescreen (1,85 : 1)
- poměr stran netelevizních displejů velmi rozmanitý
⇒ vznik nového široce akceptovaného poměru stran nepravděpodobný
- jiné snahy filmových studií o zvýšení tržeb z kin (3D, prostorový zvuk, vůně apod.) také nejsou příliš úspěšné

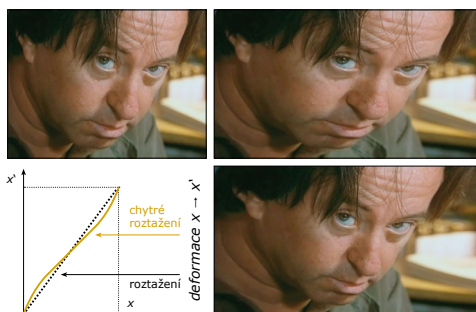
POMĚR STRAN OBRAZU

- zejména kvůli televizním obrazovkám potřebujeme konverze mezi obrazy různých poměrů stran
- letterbox (pillarbox)
 - doplnění na požadovaný poměr stran černými pruhy
 - plocha displeje nevyužita, mnoho diváků nechápe důvod
- roztažení, chytré roztažení
 - zachován veškerý obraz za cenu jeho deformace
- pan&scan
 - zobrazen pouze výřez s „nejdůležitější“ částí obrazu
 - zničení kompozice obrazu, ale mnoho diváků to preferuje
- natáčení plnou aperturou (open matte)
 - natáčení např. 4 : 3, ale kompozice tvořena s ohledem na projekční výřez 1,85 : 1
- někdy se kvůli kompromisu přístupy kombinují

POMĚR STRAN OBRAZU



POMĚR STRAN OBRAZU



POMĚR STRAN OBRAZU



pan&scan (ořez)



zamýšlený poměr stran



open matte – neoříznutý obraz




zamýšlený poměr stran (dvojdetail)

POMĚR STRAN OBRAZU

- princip „open matte“ ukazuje, že snímáný a zobrazený obraz nemusí být totožné
- obecně je třeba vzít v úvahu:
 - klasický film: okraje clony (okeničky) mohou mít vady, nepřesnostmi kamery nejsou okraje snímku stejné, ...
 - analogový televizní signál: okraje obrazu mohou být poškozeny prudkým náběhem jasu apod.
- při digitalizaci, duplikaci filmu apod. ale obvykle požadujeme kompletní záznam včetně okrajů
 - ⇒ projekce výřezu obrazového pole (může mít i jiný poměr stran než kamerový originál)
 - ⇒ je třeba definovat „technickou velikost snímku“ a „užitečnou oblast, která bude určitě zobrazena“

POMĚR STRAN OBRAZU

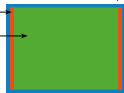
FILM

- kamerová okenička (apertura) —————→ 
- projekční okenička – promítání v kině
např. 21,11 × 11,33 mm
(na obrázku červeně, je prakticky stejná jako telecine okenička)
- telecine okenička – převod pro TV obraz
např. 20,95 × 11,32 (16:9 letterbox)

POMĚR STRAN OBRAZU

TELEVIZNÍ OBRAZ

- technická velikost např. 720 × 576 (SDTV „PAL“)
- aktivní nepoškozený obraz např. 704 × 576
 - čísla plynou z digitalizace TV standardů
 - čísla volena mj. s ohledem na kompresi (násobky 16)
- cca 672 × 535 „bezpečná akce“
- cca 624 × 518 „bezpečný text“
- kvůli nepřesnostem analogové techniky nešlo bezpečné oblasti určit přesně
- ořezávání se též říká „overscan“
- u digitální HDTV by teoreticky overscan nemusel být, ale v praxi jej mnoho výrobců dělá – snazší kompatibilita s analogovým vysíláním



SNÍMKOVÁ FREKVENCE

IDEÁLNÍ SNÍMKOVÁ FREKVENCE

- video = sled statických snímků ⇒ vzorkování času
- volba parametrů vzorkování času je obvykle kompromisem
 - Kolik snímků za vteřinu zaznamenat?
 - Jak má jeden vzorek vypadat – záznam obrazu v daný časový okamžik, nebo „průměr“ přes časový interval?
- pojem „ideální snímková frekvence“ záleží na formulaci dotazu:
 - Jak krátký děj jsme schopni zaznamenat?
 - Jak rychle se musí snímky střídát, aby obraz neblíkal?
 - Jak rychle se musí snímky střídát k navození dojmu pohybu?

SNÍMKOVÁ FREKVENCE

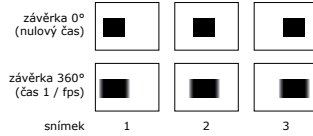
JAK KRÁTKÝ DĚJ JSME SCHOPNI ZAZNAMENAT?

- rozpoznáme záblesk delší než 1/400 s
- rozpoznáme dočasné zhasnutí světla delší než 1/100 s
- při „bliknutí“ obrazu delším než 1/200 s lze rozpoznat obsah obrazu
- frekvence stovek snímků za vteřinu se v multimediích prakticky nepoužívají
 - výjimka: speciální technika pro „zpomalení času“ (overcranking, slow motion) – natáčení vysokou snímkovou frekvencí, projekce normální snímkovou frekvencí; důležité pro sportovní přenosy

SNÍMKOVÁ FREKVENCE

VZORKOVÁNÍ V ČASU

- záznam několika snímků za sekundu
- *frames per second (fps)*
- extrémní záznamu jednoho snímku:
 - závěrka otevřená po „téměř nulový čas“ \Rightarrow snímek ostrý
 - závěrka otevřena maximálně po dobu $1 / \text{fps}$
- delší čas závěrky \Rightarrow snímek rozmazaný pohybem (motion blur; pohybem objektu nebo kamery)
- větší rozmazání \Rightarrow menší kontrast obrazu (viz blikání obrazu)



SNÍMKOVÁ FREKVENCE

REKONSTRUKCE V ČASU

- zobrazení snímků na displeji
- extrémní zobrazení:
 - snímek jen blikne (zobrazení po téměř nulový čas): díky setrvačnosti oka zůstane vjem až do dalšího snímku
 - snímek zobrazen po dobu $1 / \text{fps}$
- problém zobrazení „nulovou“ dobu: obraz může blikat
- problém zobrazení po nenulovou dobu:
 - oko sleduje zdánlivý pohyb objektu v obraze, tj. spojitě se pohybuje (otáčí)
 - při pohybu oka je ale po dobu $1 / \text{fps}$ snímek neměnný \Rightarrow obraz snímku na sítnici rozmazaný pohybem \Rightarrow vjem pohyblivého objektu neostrý

SNÍMKOVÁ FREKVENCE

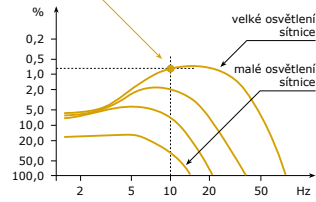
VJEM POHYBU

- při dlouhém času závěrky bývá 18 fps dostačující
 - amatérské filmy mívaly 16 fps, animované filmy i méně
- dnešní filmový standard – 24 fps – byl zaveden kvůli dostatečné rychlosti filmového pásu se zvukovou stopou
- plynulost pohybu závisí na kontrastu obrazu (resp. ostrosti hran)
 - pomalé pohyby, rozostřené hrany: stačí 10 fps i méně
 - rychlé pohyby, ostré snímky vyžadují i více než 50 fps

SNÍMKOVÁ FREKVENCE

BLIKÁNÍ OBRAZU (FLICKER)

- vjem blikání závislý mimo jiné na poměru střídajících se jasů a jasové adaptaci oka
- popis křivkami TSF (temporal contrast sensitivity function)
příklad: při dobrém osvětlení vnímáme při frekvenci 10 Hz střídání jasů lišících se nejméně o 0,8 %
- maximální citlivost při dostatku světla a frekvenci 10–20 Hz



SNÍMKOVÁ FREKVENCE

- vjem blikání dále závisí na zorném úhlu
– na okraji zorného pole je citlivost na blikání vyšší
- experimentálně zjištěné minimální frekvence blikání obrazu:

zobrazení	obraz	prostředí	frekvence
kino (promítací plátno)	velký	tma	48 Hz
malý CRT televizor	malý	šero	50 Hz
velký CRT televizor	střední	šero	100 Hz
kancelářský displej	malý	světlo	60 Hz

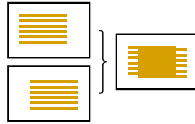
- tma = jasová adaptace oka je dána pouze obrazem
- šero = průměrný jas okolí cca 5 % jasu bílé v obrazu
- světlo = průměrný jas okolí cca 20 % jasu bílé v obrazu

SNÍMKOVÁ FREKVENCE

- údaje o blikání nemají smysl pro displeje, které neblíkají (LCD, digitální projekce apod.)
– u nich se ale při malém fps projevuje problém s neostrostí pohybujícího se obrazu
- je třeba najít kompromis:
– dostatečný počet fps pro omezení vjemu blikání
– skutečně nutný počet zaznamenaných snímků (spotřeba filmového materiálu, datový tok digitální televize apod.)

SNÍMKOVÁ FREKVENCE

- řešení v analogové televizi: rozklad snímků na půlsnímky
 - rozklad snímku na řádky
 - liché řádky tvoří 1. půlsnímek, sudé tvoří 2. půlsnímek (nebo obráceně)
 - snímání a zobrazení půlsnímků (fields)
 - ⇒ fields per second = 2× frames per second
 - ⇒ redukce blikání, datový tok stejný jako při snímkové frekvenci fps
 - složení dvou půlsnímků do snímku vede k zubatým okrajům pohyblivých objektů
 - ⇒ v digitálním světě přináší víc problémů, než kolik řeší



SNÍMKOVÁ FREKVENCE

- terminologie:
 - obraz snímáný po půlsnímcích – *prokládaný (interlaced)* (půlsnímky snímány v různých časech)
 - obraz snímáný po snímcích – *progresivní (progressive)*
- redukcí datového toku lze dosáhnout lépe metodami ztrátové komprese obrazu (video) – důvody pro zavedení prokládaného obrazu už dnes prakticky zmizely
- pozor: pojem „progresivní“ se někdy v jiném smyslu používá při ukládání statického obrazu pro pomalé internetové připojení – napřed je uložen (a přenesen) obraz v nízké kvalitě, další datový přenos kvalitu vylepšuje

SNÍMKOVÁ FREKVENCE

- řešení při promítání z filmového pásu: opakování snímků
 - rotující clona zamezuje promítání snímku během posunu filmu na další snímek
 - dvě nebo tři lamely: frekvence blikání 2× nebo 3× vyšší než fps (tj. 48 nebo 72 Hz)
- problém (judder, stutter):
 - oko sleduje zdánlivý pohyb objektu ve snímku ⇒ spojitě se pohybuje (otáčí se) tak, aby byl objekt stále na stejném místě sítnice
 - během zopakovaného snímku je objekt na stejném místě snímku, ale oko už je pootočené
 - ⇒ obraz objektu je na jiném místě sítnice
 - ⇒ trhaný pohyb



SNÍMKOVÁ FREKVENCE

- řešení u velkoplošné televize s blikajícím obrazem (CRT):
 - načtení několika půlsnímků (např. $A_L A_S B_L B_S$)
 - 2× rychlejší zobrazení, např.
 - $A_L A_S A_L A_S B_L B_S B_L B_S$ pro obraz bez pohybu
 - $A_L A_L A_S A_S B_L B_L B_S B_S$ pro obraz s pohybem
 - kromě problému s trhaným pohybem navíc problém se skládáním půlsnímků do jediného snímku
 - tzv. 100 Hz televize (double scan)
- ideální řešení: interpolace s kompenzací pohybu (motion compensation)
 - načtení několika snímků, resp. půlsnímků
 - odhad pohybu v různých částech obrazu
 - výpočet mezilehlých snímků (nebo půlsnímků)
 - rychlé zobrazení původních a interpolovaných snímků

SNÍMKOVÁ FREKVENCE

STANDARDNÍ (PŮL)SNÍMKOVÉ FREKVENCE

- filmový pás: 24 fps
- analogová televize v USA, Japonsku („NTSC“)
 - původně půlsnímkové frekvence 60 Hz (de facto 30 fps): stejná jako frekvence elektrické sítě (snazší konstrukce televizní elektroniky)
 - pro zavedení zpětně kompatibilního barevného vysílání bylo třeba (více méně z úředních důvodů) změnit půlsnímkovou frekvenci na $60 \times 1000 / 1001 \approx 59,94$ Hz (de facto 29,97 fps)
 - čísla 1000 a 1001 volena tak, aby byl poměr skoro 1 a aby měly jednoduchý rozklad na prvočísla pro snazší konstrukci elektroniky ($1000 = 2^3 \times 5^3$, $1001 = 7 \times 11 \times 13$)

SNÍMKOVÁ FREKVENCE

- analogová televize v Evropě („PAL“)
 - půlsnímková frekvence 50 Hz: stejná jako frekvence elektrické sítě (de facto 25 fps)
 - konstrukce elektroniky hodně vychází z 60 Hz elektroniky, důsledky viz rozlišení obrazu
- obnovovací frekvence moderních displejů obvykle měnitelné, aby bylo možné snadno zobrazovat archivní materiál
- při tvorbě pořadu z materiálů různých (půl)snímkových frekvencí je třeba umět standardní konverze
- zkratky PAL a NTSC se vztahují k analogovému kódování barvy v televizním signálu; obvykle ale PAL pracuje s 50 Hz, NTSC s 60 (59,94) Hz – proto uvozovky u „PAL“ a „NTSC“

SNÍMKOVÁ FREKVENCE

KONVERZE SNÍMKOVÉ FREKVENCE

- konverze z filmového pásu (celé snímky) na televizní půlsnímky (*telecine*): rozklad původních políček na půlsnímky s lichými a sudými řádky
- film → „PAL“ (24 fps → 25 fps)
 - **2:2 pulldown**: snímky A B C → půlsnímky $A_L A_S B_L B_S C_L C_S$
tj. 24 fps → 48 půlsnímků/s
 - následuje zrychlené přehrání rychlostí 50 půlsnímků/s
tj. původní délka 60 minut se zkrátí na 57 minut 36 s
 - zvukovou stopu je třeba zrychlit při zachování výšky zvuku – viz zvukové efekty pitch shift/stretch
 - zavádí značný zmatek do specifikace délky filmu (je udána ve frekvenci 24, nebo 25 fps?)

SNÍMKOVÁ FREKVENCE

- film → „NTSC“ (24 fps → 29,97 fps)
 - **2:3 pulldown**: A B C → $A_L A_S B_L B_S B_L C_S C_L$
tj. 2 snímky se převedou na 5 půlsnímků,
tj. 24 fps → 60 půlsnímků/s
 - následuje zpomalené přehrání 59,94 půlsnímků/s
tj. změna délky z 60 minut na 60 minut 3,6 s
 - zpomalení zvuku pro zachování synchronizace
změna výšky při prostém zpomalení nepostřehnutelná
- je-li třeba z „NTSC“ záznamu filmu zpětně vyrobit z půlsnímků celé snímky, je třeba proces otočit (*inverse telecine*)
 - při zachování zvukové stopy vede na snímkovou frekvenci **23,976 fps** – dnes de facto další standard

SNÍMKOVÁ FREKVENCE

- 50 Hz („PAL“) → 60 Hz („NTSC“)
 - nejjednodušší: duplikování každého 5. půlsnímku
 - levné:
rekonstrukce 5 celých snímků A_1 až A_5 z 10 půlsnímků
konstrukce 6 celých snímků B_1 až B_6 alfa kompozicí
($B_1 = A_1$, $B_2 = 0,17 A_1 + 0,83 A_2$, $B_3 = 0,33 A_2 + 0,67 A_3$,
 $B_4 = 0,50 A_3 + 0,50 A_4$, $B_5 = 0,67 A_4 + 0,33 A_5$, ...)
 - nejlepší: místo alfa kompozice motion compensation
- 60 Hz („NTSC“) → 50 Hz („PAL“)
 - nejjednodušší: vyhazování každého 6. půlsnímku
 - složitější varianty obdobné jako v opačném procesu

SNÍMKOVÁ FREKVENCE

TIMECODE

- kvůli střihu apod. je třeba jednoznačně označit každý snímek pořadu – timecode
- standardní podoba: hour:minute:second:frame
- film: 0:0:0:0; ... ; 0:0:0:23; 0:0:1:0; ...
- „PAL“: 0:0:0:0; ... ; 0:0:0:24; 0:0:1:0; ...
- pro „NTSC“ problém s 29,97 fps
⇒ dropframe timecode – vynechat čísla „frame“ 0, 1 (nikoliv snímky – ty zůstávají všechny!) v první vteřině každé minuty kromě minut 0, 10, ..., 50)
0:0:0:0; ... ; 0:0:0:29; 0:0:1:0; 0:0:1:1; ...
0:0:59:29; 0:1:0:2; 0:1:0:3; ...
0:9:59:29; 0:10:0:0; 0:10:0:1; 0:10:0:2; ...

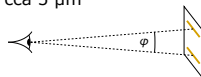
ROZLIŠENÍ OBRAZU

- standardní vzorkování bitmapového obrazu: pravouhlá síť obrazových elementů (pixelů)
 - existují i nepravouhlé varianty, ale v praxi se neujaly
 - analogová televize vzorkovala obraz v čase (záznam T snímků za vteřinu), snímek rozkládala do řádek (vzorkování v ose Y), řádka už byla popsána spojitým signálem
 - vzorkování v ose X zavedeno až číslíkovým zpracováním
- vzorkování: Má pixel reprezentovat jas („barvu“) v konkrétním bodu, nebo průměrný jas v jistém okolí?
- rekonstrukce: Jak má displej z diskretních vzorků vytvořit spojitý 2D obraz? Jak má vypadat jeden pixel?



ROZLIŠENÍ OBRAZU

- hustota vzorkování dána rozlišovací schopností oka (zrakovou ostrostí)
 - průměr čípku (světlocitlivé buňky) cca 5 μm
 - oko od sebe rozliší 2 rovnoběžné černé linky na bílém pozadí
- při úhlové vzdálenosti φ cca 1'
- rozlišovací schopnost horší, je-li kontrast bodů proti pozadí menší nebo při horším osvětlení (viz CSF)
- pokud máme očima posoudit, zda na sebe dvě čáry navazují, je rozlišovací schopnost vyšší

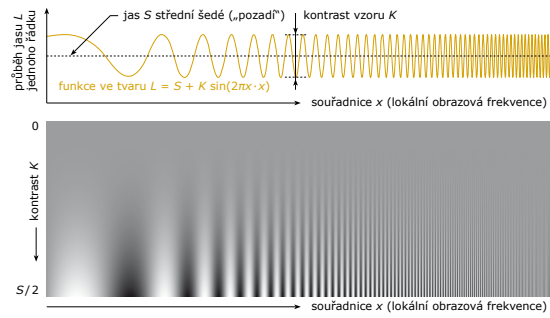


test ostrosti vidění – rozpoznatelnost orientace



posouzení návaznosti čar

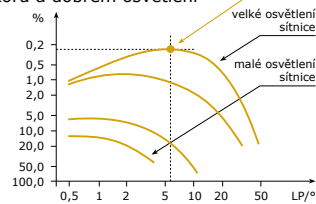
ROZLIŠENÍ OBRAZU



ROZLIŠENÍ OBRAZU

CONTRAST SENSITIVITY FUNCTION (CSF)

- příklad: při dobrém osvětlení vnímáme rozdíl v jasu téměř 0,2 %, je-li jemnost vzoru cca 6 LP/° (párů linek/stupeň)
- maximální jemnost vzoru (přes 50 LP/°) vnímáme při velkém kontrastu vzoru a dobrém osvětlení
- nejjemněji (1 % jasu nebo lepší) vnímáme kontrast při frekvenci 2–5 LP/°
- citlivost roste s rostoucím osvětlením



ROZLIŠENÍ OBRAZU

- pro potřeby multimédií se uvažuje úhlová rozlišovací schopnost oka 1–2'
- pro velmi kontrastní obraz (černý text na bílém pozadí) je třeba přísnější kritérium
 - rozlišovací schopnost $\varphi = 1'$
 - ⇒ pixel nesmí zabrat zorný úhel větší než $\varphi / 2$
 - pozorovací vzdálenost displeje 300 mm
 - ⇒ rozměr pixelu maximálně $300 \times \tan \varphi / 2 = 0,044$ mm
 - ⇒ hustota pixelů cca 600 ppi (pixels per inch)
- pro obraz typu fotografie je kontrast na hranách menší
 - rozlišovací schopnost $\varphi = 2'$
 - ⇒ hustota pixelů cca 300 ppi (pixels per inch)
- obraz typu video je rozmazanější ⇒ kontrast ještě menší
 - ⇒ hustota pixelů stačí menší

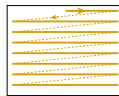
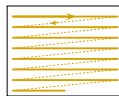
ROZLIŠENÍ OBRAZU

- při reprodukci obrazu nemáme možnost ovlivnit pozorovací úhel, resp. pozorovací vzdálenost
- rozlišení displejů vychází z předpokládaného použití
 - standardní televize: vertikální pozorovací úhel cca 8°
(výška obrazovky 30 cm, pozorovací vzdálenost cca 2 m)
⇒ počet řádků obrazu cca $8 \times 60 = 480$
 - filmové plátno: horizontální pozorovací úhel cca 45°
⇒ počet sloupců obrazu cca $45 \times 60 = 2700$
 - displej notebooku: horizontální pozorovací úhel cca 30°
(displej 16 : 9, úhlopříčka 15", vzdálenost 60 cm)
⇒ počet sloupců obrazu cca $30 \times 60 = 1800$
- v praxi je rozlišení displeje kompromisem mezi cenou a kvalitou (a technickými limity)
- rozlišení kamery se odvozuje od rozlišení displeje

ROZLIŠENÍ OBRAZU

STANDARDNÍ TV ROZLIŠENÍ

- analogová televize „NTSC“ (525/59,94)
 - v původní 60 Hz televizi obraz vykreslován řádku po řádce s řádkovou frekvencí $15750 \text{ Hz} = (30 \times 525)$
⇒ 525 řádků na snímek
(resp. 262,5 řádku/půlsnímek)
 - v průběhu signálu je vykreslovací paprsek občas zhasnutý (návrat na začátek řádku, návrat na začátek půlsnímku)
⇒ pouze 483 řádek nese aktivní obrazovou informaci
 - pro počítačové zpracování se redukuje na 480 řádek (násobek 16)
 - počet řádek zachován i po úpravě 60 Hz → 59,94 Hz



1. a 2. půlsnímek

ROZLIŠENÍ OBRAZU

- analogová televize „PAL“ (625/50)
 - snaha využít elektroniku systému 525/59,94
⇒ řádková frekvence $15625 \text{ Hz} (= 625 \times 25 = 15750)$
⇒ 625 řádků na snímek (resp. 312,5 řádku/půlsnímek)
 - aktivní obraz pouze v 576 řádcích
- z historických důvodů se tedy rozlišení televizního obrazu udává počtem řádků
 - označení televizního signálu např. 525/59,94 nebo 625/50
 - označení aktivního obrazu např. 480i29,97 nebo 576i25
 - písmeno „i“ označuje prokládaný (interlaced) obraz, písmeno „p“ označuje neprokládaný (progressive) obraz
 - označení samotného rozlišení jen např. 480i nebo 576i

ROZLIŠENÍ OBRAZU

- při digitalizaci televizního signálu (navzorkování analogového signálu) snaha o celý počet vzorků na řádku v obou standardech 525/59,94 a 625/50
 - řádková frekvence „PAL“: $15\,625\text{ Hz} = 5^4 \cdot 5^2\text{ Hz}$
 - řádková frekvence „NTSC“: $15\,750 \times 1000 / 1001\text{ Hz}$
 $= (7 \cdot 3 \cdot 5^2) \cdot (5 \cdot 6) \cdot (5^3 \cdot 2^3) / (7 \cdot 11 \cdot 13)\text{ Hz}$
 $= 15\,734,26\dots\text{ Hz}$
 - poměr řádkových frekvencí „PAL“ : „NTSC“ = 143 : 144
 - nejnižší společná frekvence
 $15\,625 \cdot 144 = 15\,734,26\dots \cdot 143 = 2\,250\,000\text{ Hz}$
 \Rightarrow vzorkování násobkem 2,25 MHz
 - rozumné zachycení detailů v řádce při vzorkování frekvencí $6 \times 2,25 = 13,5\text{ MHz}$
 - \Rightarrow „PAL“ 864 vzorků, „NTSC“ 858 vzorků na řádek

ROZLIŠENÍ OBRAZU

- digitální televize se standardním rozlišením (SDTV)
 - čas vysílání jedné řádky rozdělen na aktivní obrazovou oblast a dobu, kdy se vykreslovací paprsek vrací na začátek řádky
 - po navzorkování je obraz v 720 vzorcích
 - \Rightarrow rozlišení obrazu „PAL“ 720×576 , „NTSC“ $720 \times 480\text{ px}$ (obraz nepoškozený náběhy jasu na začátku a konci aktivní části řádky např. 704×576)
 - toto rozlišení se podle historicky první implementace často nazývá „D1“
 - kompatibilní rozlišení s redukcí datového toku:
CIF (Common Intermediate Format) – $352 \times 288\text{ px}$
 - čtvrtinové rozlišení: QCIF – $176 \times 144\text{ px}$

ROZLIŠENÍ OBRAZU

- obraz SDTV má předepsaný poměr stran $4 : 3$ ($\approx 1,33$) ale $704 / 576 \approx 1,22$; $720 / 576 = 1,25$ atd.
 \Rightarrow standardní vzorkování SDTV vede k „*obdélníkovým pixelům*“
- kdyby byly pixely „čtvercové“, měl by být počet sloupců:
576i („PAL“): $576 \times 4 / 3 = 768\text{ px}$
480i („NTSC“): $480 \times 4 / 3 = 640\text{ px}$
- pixel 576i („PAL“):
šířka / výška = $768 / 720 \approx 1,07 : 1$ (pixel „široký“)
- pixel 480i („NTSC“):
šířka / výška = $640 / 720 \approx 0,89 : 1$ (pixel „úzký“)
- širokouhlá SDTV předepisuje stejnému signálu (tj. 720 vzorků na řádku) poměr stran $16 : 9$
 \Rightarrow pixely „velmi široké“ – *anamorfnní záznam*

ROZLIŠENÍ OBRAZU

- při zpracování digitálního obrazu se často zavádí pojmy
 - SAR (source aspect ratio) – počet sloupců / počet řádků
např. pro SDTV PAL je $SAR = 720 / 576 = 1,25$
 - PAR (pixel aspect ratio) – šířka pixelu / výška pixelu
např. pro SDTV PAL je $PAR \approx 1,07$
 - DAR (display aspect ratio) – šířka obrazu / výška obrazu
např. pro SDTV PAL je $DAR = 4 / 3 \approx 1,33$
 - platí
 $DAR = SAR \times PAR$
- digitální obraz by měl obsahovat „metadata“:
počet sloupců, počet řádků (\Rightarrow SAR) a PAR, nebo DAR
- přehrávač by měl tato „metadata“ respektovat
 - zejména na PC to často nefunguje

ROZLIŠENÍ OBRAZU

HDTV ROZLIŠENÍ

- primární požadavky pro HD (high definition) standard:
 - poměr stran obrazu 16 : 9 (tj. $4 / 3 \times 4 / 3$)
 - dvojnásobný zorný úhel oproti SDTV
 - dobrá kompatibilita s digitálním zpracováním a s SDTV
- \Rightarrow počet sloupců $720 \times 2 \times 4 / 3 = 1920$
- \Rightarrow pro čtvercové pixely: počet řádek $1920 \times 9 / 16 = 1080$
- \Rightarrow rozlišení **1920 × 1080 px** (Full HD)
- snímkové frekvence kompatibilní s SDTV a filmem:
23,976 24 25 29,97 30 50 59,94 60 Hz
- vyšší frekvence k dispozici progresivní i prokládané
- pro nižší datový tok zavedeno 2 / 3 redukované rozlišení
1280 × 720 px (jen progresivní obraz)

ROZLIŠENÍ OBRAZU

DIGITALIZACE FILMOVÉHO PÁSU

- referencí pro kvalitu filmového obrazu je šířka filmového pásu \Rightarrow kvalita digitalizace se historicky určuje počtem sloupců
- nejběžnější distribuční standardy digitálního kina:
 - **2K** (2048 × 1080 px) – zatím nejobvyklejší
 - **4K** (4096 × 2160 px) – dříve poměrně exkluzivní, dnes na vzestupu
- poměr stran distribučního formátu cca 1,896 : 1
 - obraz jiného poměru stran vložen jako letterbox/pillarbox
- ideální rozlišení scanu filmového pásu je takové, aby distribuční rozlišení vzniklo nanejvýš ořezem; převzorkování na jiné rozlišení snižuje ostrost snímku

ROZLIŠENÍ OBRAZU

UHDTV ROZLIŠENÍ

- televizní formát Full HD (1920 × 1080 px) podobný filmovému 2K (2048 × 1080 px)
 - odpovídá cca 2,1 Mpx
- z diskuse o rozlišení plyne, že pro velkoplošné displeje je Full HD na hranici kvality vzorkování
- definice Ultra HD televizního rozlišení (UHDTV):
 - rozlišení násobkem HD rozlišení
 - 4K UHDTV (2160p): 3840 × 2160 px (odpovídá 8,3 Mpx)
 - 8K UHDTV (4320p): 7680 × 4320 px (odpovídá 33 Mpx)
- nešťastné pojmenování: televize označovaná 4K UHD nemá stejné rozlišení jako 4K DCI digitální filmový obraz (= Digital Cinema Initiatives – standardizace digitálního kina)

ROZLIŠENÍ OBRAZU



ROZLIŠENÍ OBRAZU



720 × 576 (SDTV / PAL DVD) 1920 × 1080 (Full HD / Blu-ray disc) 3840 × 2160 (4K UHD; 65mm film)

ROZLIŠENÍ OBRAZU

DALŠÍ STANDARDNÍ TERMINOLOGIE

- v obecné počítačové grafice, internetovém publikování a specifikacích displeje je obvyklé udávat rozlišení počtem sloupců \times počtem řádek (např. 1920 \times 1200)
- v digitální fotografii obvykle celkový počet pixelů v Mpx (např. 18 Mpx)
- v tiskovém publikování obvykle fyzický rozměr obrázku a hustota pixelů v ppi (např. 10 \times 10 cm² při 300 ppi)
 - někdy se jednotka ppi nesprávně označuje jako dpi (dots per inch), existuje i jednotka lpi (lines per inch)
 - podrobnosti viz pixel spread function (PSF)

ROZLIŠENÍ OBRAZU

VZORKOVÁNÍ PLOCHY

- pojem „pixel“ (obrazový element) je poměrně nejasný
- jas dopadající na snímač: spojitá funkce $L(x, y)$
- ideální vzorkování: bodové vzorky $L[i, j] = L(i \Delta x, j \Delta y)$
- praktické vzorkování: snímací element („pixel“) má rozměry $A_x \times A_y$ (maximálně $\Delta x \times \Delta y$, typicky trochu menší)

$$L'[i, j] = \frac{1}{A_x A_y} \int_{-A_y/2}^{A_y/2} \int_{-A_x/2}^{A_x/2} L(i \Delta x - \xi, j \Delta y - \eta) d\xi d\eta$$

- praktické vzorkování odpovídá bodovému vzorkování funkce

$$L'(x, y) = \frac{1}{A_x A_y} \int_{-A_y/2}^{A_y/2} \int_{-A_x/2}^{A_x/2} L(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta$$

$$= L(x, y) \otimes (\text{rect}(x / A_x) \text{rect}(y / A_y)) / (A_x A_y)$$

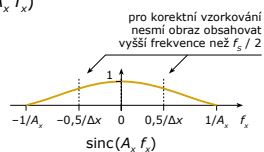
ROZLIŠENÍ OBRAZU

- A_x, A_y menší \Rightarrow funkce $L(x, y)$ a $L'(x, y)$ jsou si podobnější, protože platí:

$$\begin{aligned} \text{FT}\{L(x, y)\} &= \hat{L}(f_x, f_y) \\ \text{FT}\{L'(x, y)\} &= \hat{L}'(f_x, f_y) \\ &= \hat{L}(f_x, f_y) / (A_x A_y) \\ &\quad \times \text{FT}\{\text{rect}(x / A_x) \text{rect}(y / A_y)\} \end{aligned}$$

$$\text{FT}\{\text{rect}(x / A_x)\} = |A_x| \text{sinc}(A_x f_x)$$

$$\text{sinc}(\xi) = \frac{\sin(\pi\xi)}{\pi\xi}$$



ROZLIŠENÍ OBRAZU

- vliv nenulové plochy snímacího elementu (pixelu kamery): pokles amplitudy vysokých frekvencí
 - ⇒ pokles ostrosti obrazu
 - ⇒ při zobrazování je třeba pokles amplitudy kompenzovat tzv. doostřením (zvýšení amplitudy vysokých frekvencí)
 - praktická implementace doostření: FIR filtr, frekvenční charakteristika inverzní k poklesu amplitudy
 - dvourozměrná filtrace: aplikace 1D filtru na všechny řádky, poté na všechny sloupce (nebo konstrukce 2D FIR filtru – mnohem pomalejší běh)
- na druhou stranu:
 - menší plocha elementu ($A_x < \Delta x$)
 - ⇒ element detekuje méně dopadající energie
 - ⇒ větší fotonový šum

ROZLIŠENÍ OBRAZU

- při vzorkování může dojít k aliasingu
 - vizuálnímu projevu se říká moiré [čti: moaré]
 - nejviditelnější při snímání periodických vzorů (tkanina, dlažba, ...), ve videu se navíc moiré pohybuje
 - ⇒ před vzorkováním je třeba z obrazu vyloučit frekvence vyšší než $0,5/\Delta x$ (resp. $0,5/\Delta y$)
 - praktická implementace: před snímačem difuzér („mírně mléčné sklo“)

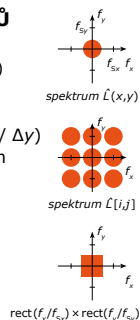


Vzor moiré
(Wikimedia Commons, licence CC 3.0)

ROZLIŠENÍ OBRAZU

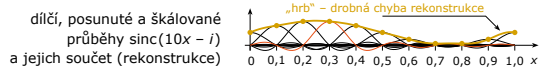
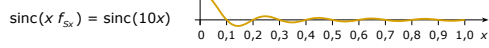
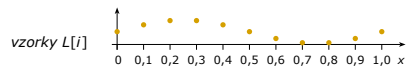
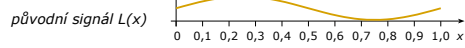
REKONSTRUKCE OBRAZU ZE VZORKŮ

- ze vzorků $L[i, j]$, resp. $L'[i, j]$, je třeba rekonstruovat původní spojitou funkci $L(x, y)$
- ideální rekonstrukce (viz též přednáška 5)
 - vzorkování s roztečí vzorků $\Delta x, \Delta y$ (vzorkovací frekvence $f_{sx} = 1 / \Delta x, f_{sy} = 1 / \Delta y$)
 - spektrum navzorkovaného signálu součtem kopií původního spektra s roztečí f_{sx}, f_{sy}
 - ideální rekonstrukce vynásobením spektra funkcí $\text{rect}(f_x / f_{sx}) \times \text{rect}(f_y / f_{sy})$
 - ⇒ konvoluce $L[i, j]$ funkcí $\text{sinc}(x f_{sx}) \times \text{sinc}(y f_{sy})$



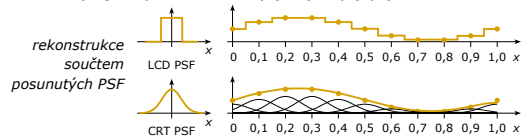
ROZLIŠENÍ OBRAZU

- 1D příklad: $\Delta x = 0,1$



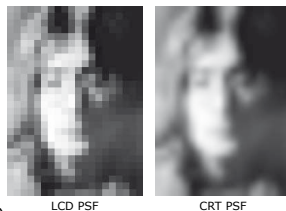
ROZLIŠENÍ OBRAZU

- na ilustraci není „ideální rekonstrukce“ dokonalá
 - „ideální kamera“ by měla snímat nekonečně velký obraz
- „ideální displej“ by měl mít „pixel“ tvaru $\text{sinc}(x) \text{sinc}(y)$
 - tvar pixelu: *pixel spread function* (PSF)
- obojí technicky vyloučené
- LCD panely (apod.) – pixel tvaru $\text{rect}(x) \text{rect}(y)$
- CRT displeje – pixel tvaru $\exp(-x^2) \exp(-y^2)$



ROZLIŠENÍ OBRAZU

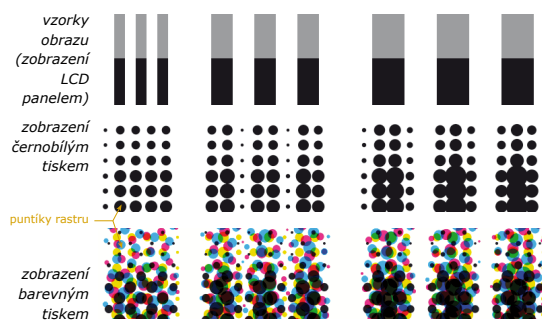
- obdélníková PSF zanášá do obrazu umělé „hrany“ (vysoké frekvence)
- gaussovská PSF obecně vede k méně ostrému, ale příjemnějšímu obrazu
- vývoj současných displejů: zvyšování rozlišení (zmenšování PSF)
 - umělé hrany méně viditelné
 - možnost simulace gaussovské (nebo jiné) PSF aproximací mnoha malými obdélníkovými PSF



ROZLIŠENÍ OBRAZU

- v tisku jsou PSF ještě jiné
 - většina technologií umí jen barvu vytisknout/nevytisknout
 - náhrada pixelu puntíkem velikosti závislé na stupni šedi (malý = světle šedá, velký = tmavě šedá)
šedá plocha nahrazena sítí (rastrem) takových puntíků
- ⇒ při označení jemnosti displeje (kamery) je vhodné mluvit o rozlišení LP/? (line pairs per ?)
- X LP/° (line pairs per degree, často též lp°): v jednom stupni zorného úhlu rozlišíme X linek vedle sebe – pro snímač kamery/displej nevhodné
 - X LP/in (line pairs per inch): na jednom palci obrazu je odlišitelných X linek vedle sebe
 - kvůli možnosti záměny s lpi (lines per inch) se místo LP často používá ekvivalentní cy (cycles), např. cy/mm

ROZLIŠENÍ OBRAZU



ROZLIŠENÍ OBRAZU

- méně vhodné je mluvit o pp? (pixels per ?) – bez znalosti PSF nic neříká
- udává jen jemnost vzorkování (scanneru, snímače kamery apod.), nejčastěji ppi (pixels per inch)
- speciální jednotky pro tisk:
 - lpi (lines per inch): počet puntíků rastru na 1 palec odlišovat od LP/in, typicky LP/in < 0,5 × lpi, lpi ≈ 2 × ppi
 - dpi (dots per inch) – puntíky rastru tvořeny elementárními kapkami inkoustu v „buňkách“, dpi udává jejich počet na 1 palec, typicky dpi > 10 × lpi

