



Obrazové snímače a jejich charakteristiky

Karel Fliegel
(fliegek@fel.cvut.cz)



□ Obrazové snímače

- ❖ Principy akumulačního snímání obrazu
- ❖ Snímací prvky CCD
- ❖ Snímací prvky CMOS

□ Snímání barevného obrazu

- ❖ Barvodělící soustava a maska filtrů CFA (Bayer)
- ❖ Obrazový snímač Foveon
- ❖ Interpolace barev – demosaicing (debayering)
- ❖ Metody vyvážení bílé WB

□ Charakteristiky snímačů

- ❖ Modulační přenosová funkce MTF
- ❖ Prostorové vzorkování obrazu

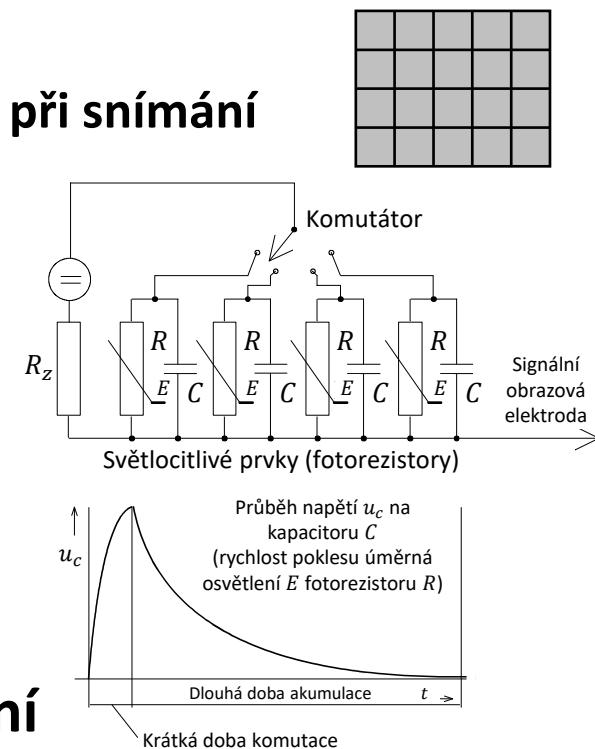
❑ Akumulační snímání obrazu

- ❖ Základní princip od **snímacích elektronek** po snímače CCD
 - Každá buňka přispívá k **tvorbě signálu** po **celou dobu trvání snímku**
 - Zvětšuje se **účinnost snímacího procesu**
 - Náboj se **akumuluje** až do okamžiku **odvedení při snímání**
- ❖ **Princip akumulačního snímání**

- Po dobu **trvání snímku (expozice)** se **kapacitor C vybíjí** přes **fotorezistor R**
- Sepnutím **komutátoru** se **uzavře obvod** a kapacitor se **nabije** přes **rezistor R_z**
- **Napětí na rezistoru R_z** představuje **obrazový signál úměrný osvětlení E**

❖ Neakumulační snímání není tak efektivní

- Informace o intenzitě světla se **převádí okamžitě** na obrazový signál
- **Nevyužívá se nárůst náboje** po celou dobu **expozice snímku**



□ Snímací elektronky u vzniku elektronické televize

❖ Snímací elektronky v kamerách již patří minulosti

- (1) S rychlým snímacím paprskem
 - Ikonoskop (1933 - Vladimir Zvorykin), superikonoskop
- (2) S pomalým snímacím paprskem
 - Superortikon, vidikon (1950)
- (A) Vnější fotoelektrický jev
 - Emise elektronů z fotokatody v závislosti na osvětlení
 - Superikonoskop, superortikon
- (B) Vnitřní fotoelektrický jev
 - Změna vodivosti fotokatody v závislosti na osvětlení
 - Vidikon, plumbikon



Vladimir Kozmič Zvorykin
(Rusko-Americký inženýr,
1888/9 -1982, vynálezce
ikonskopu)



Snímací elektronka
plumbikon

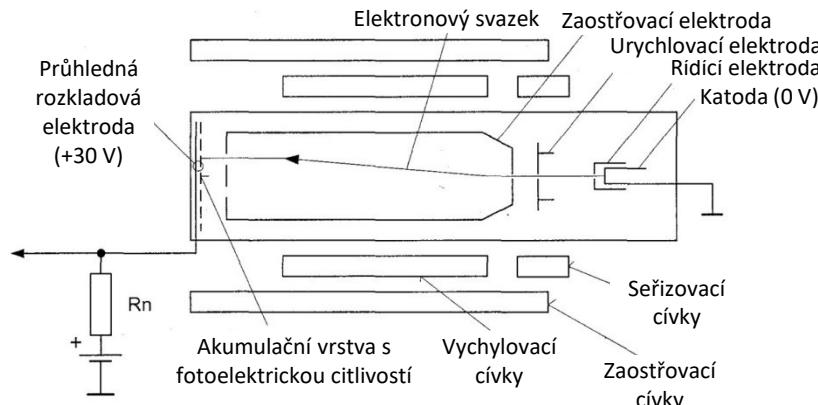
❖ V barevných TV kamerách do ~1990

hlavně vidikon (plumbikon)

- Jednoduchost, malé rozměry, vysoká kvalita obrazu, ...

□ Příklad snímací elektronky – Vidikon

❖ Konstrukce se snímacím svazkem a rozkladovou elektrodou



Princip vidikonu

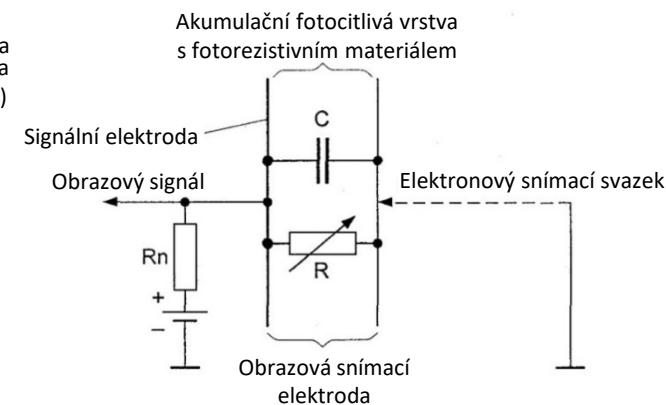


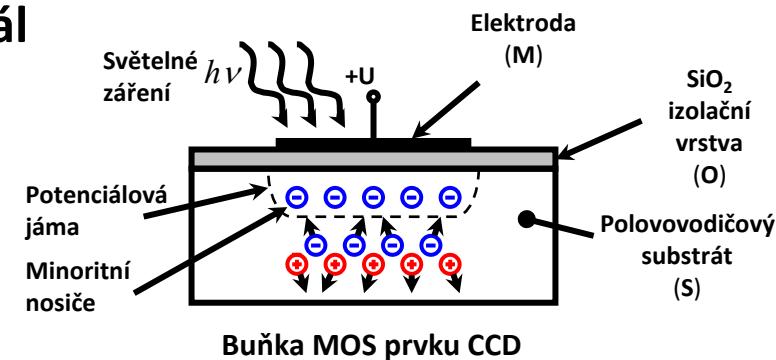
Schéma obrazového bodu rozkladové elektrody

- Rozkladová obrazová snímací elektroda
 - Vnitřní fotoelektrický jev – změna vodivosti rozkladové elektrody vlivem osvětlení fotorezistivního materiálu
 - Akumulační vrstva – po dobu snímkové periody (~40 ms) se kapacita vybíjí přes paralelní odpор
 - Míra vybíjení závisí na okamžité velikosti odporu a tím i osvětlení prvku
 - Obrazový signál – vytvořen při doplnění chybějícího náboje svazkem elektronů
 - Problém vidikonu – setrvačnost a nerovnoměrnost (vyřešil Plumbikon)

□ Snímací prvky CCD

❖ CCD – Charge Coupled Device

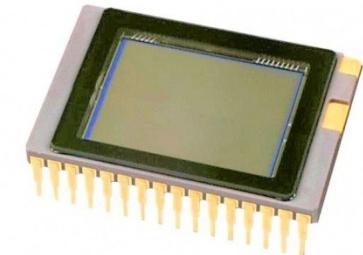
- Nábojově vázané struktury MOS (MIS) kapacitorů
 - MOS – Metal Oxide Semiconductor
 - Kovová elektroda **M**, oxidová izolační vrstva **O**, vrstva polovodiče **S**
- Převodník světelného obrazu na signál
 - Schopnost vytvářet náboj v závislosti na míře osvětlení
 - Schopnost přesouvat náboj jako v posuvném registru a vysouvat ven z obvodu
- Obsahují velký počet samostatných buněk
 - Navzájem izolované kovové elektrody
 - Tvoří spolu s izolantem SiO_2 a polovodičem **S** miniaturní kondenzátory
 - Připojením napětí na elektrodu vzniká potenciálová jáma
 - Při osvětlení generuje vnitřní fotoelektrický jev volné páry elektron – díra
 - Nosiče náboje jsou vtaženy do potenciálové jámy



□ Snímací prvky CCD

❖ CCD vynalezen v roce 1969 v AT&T Bell Labs

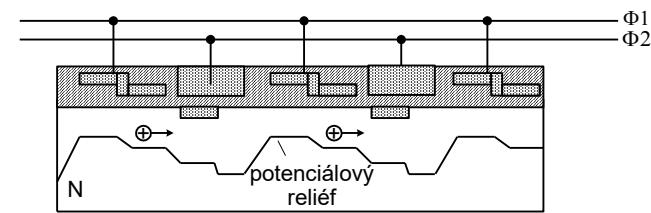
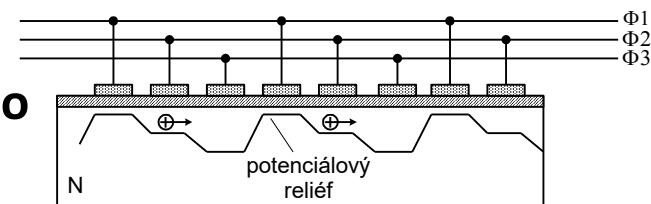
- Willard Boyle, George W. Smith – 2009 Nobelova cena



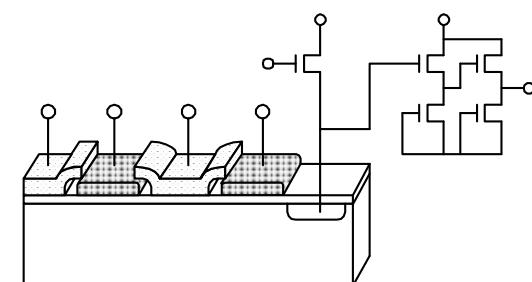
❖ Mechanismus posuvu náboje

- Užitečný náboj nemůže zůstat v jámě dlouho
- Volné nosiče vznikají také termogenerací

- Mechanismus podobný jako u posuvných registrů
 - Postupné připojování napětí na elektrody
 - Vytváří potenciálový reliéf pro přesun náboje
 - Rychlé opakování postupu pro přesun náboje k poslední elektrodě
 - Za poslední elektrodou obvody vyčtení obrazového signálu



CCD přenosové struktury



Vyčtení signálu z poslední elektrody

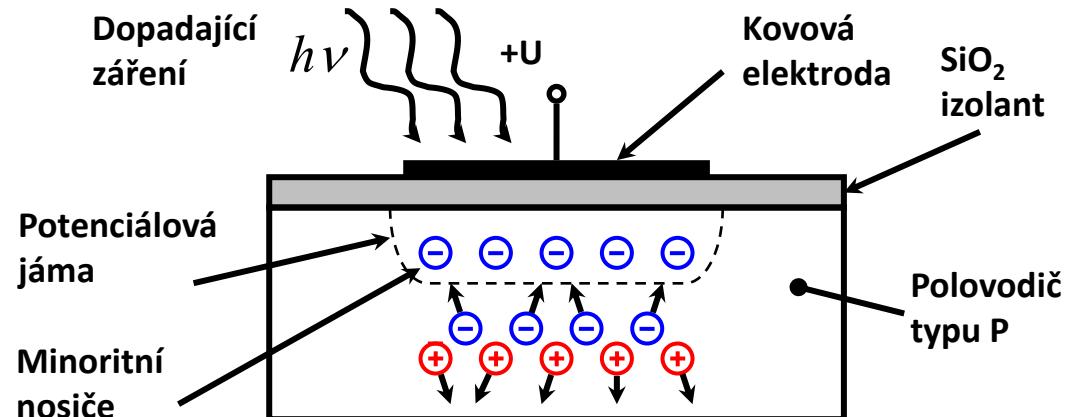
□ Základní buňka CCD snímače

- ❖ Volné nosiče náboje – **fotogenerace** a termogenerace

- **Velikost náboje** vlivem fotogenerace

$$Q = \frac{e t \eta E S}{h \nu}$$

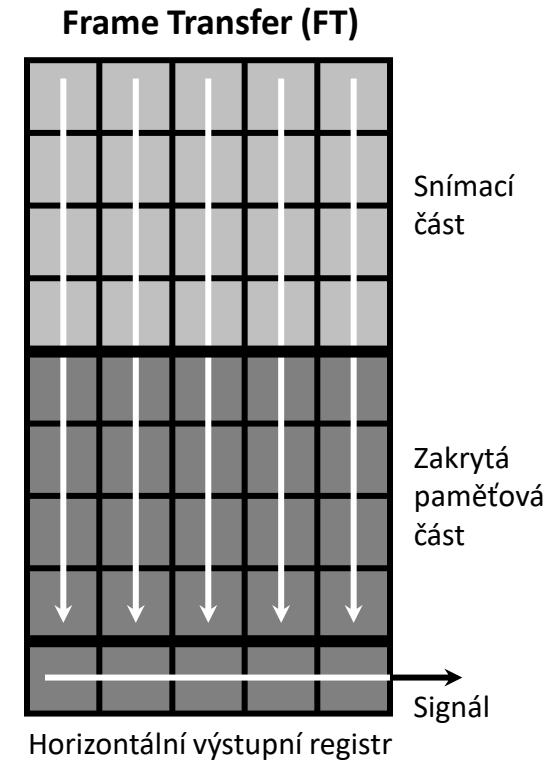
- Q - náboj
- e - náboj elektronu
- η - kvantová účinnost
- t - doba expozice
- E - osvětlení
- S - plocha
- h - Planckova konstanta
- ν - kmitočet



- **Kvantová účinnost QE (Quantum Efficiency)**

- Pravděpodobnost, že **jeden foton** vygeneruje **pár nosičů elektron-díra**
- **Kvantová účinnost** je okolo **80-90 %** u fotodiod a u **CCD** méně

- Různé typy snímacích prvků CCD
 - ❖ Podle vyčítání obrazové informace
 - ❖ Frame (Field) Transfer (FT) – (půl)snímkový přenos
 - Nejjednodušší typ uspořádání CCD
 - Dvě oblasti snímače
 - Horní snímací část přístupná světlu
 - Spodní paměťová část je zakryta
 - Náboj z horní části je během (půl)snímkového zatemnění přesunut do paměťové části
 - Náboje ve spodní části se během expozice přesouvají postupně během řádkových zatemnění do výstupního registru
 - Problém mazání obrazu ve vertikálním směru
 - Vertical smear effect
 - Lze vyřešit mechanickou rotační závěrkou

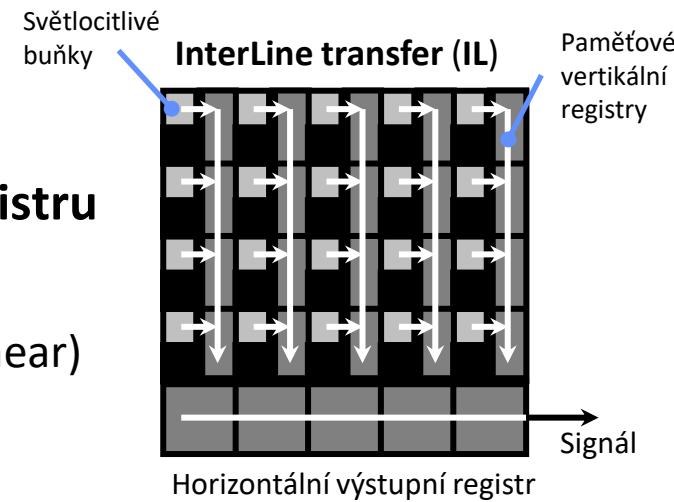


□ Různé typy snímacích prvků CCD

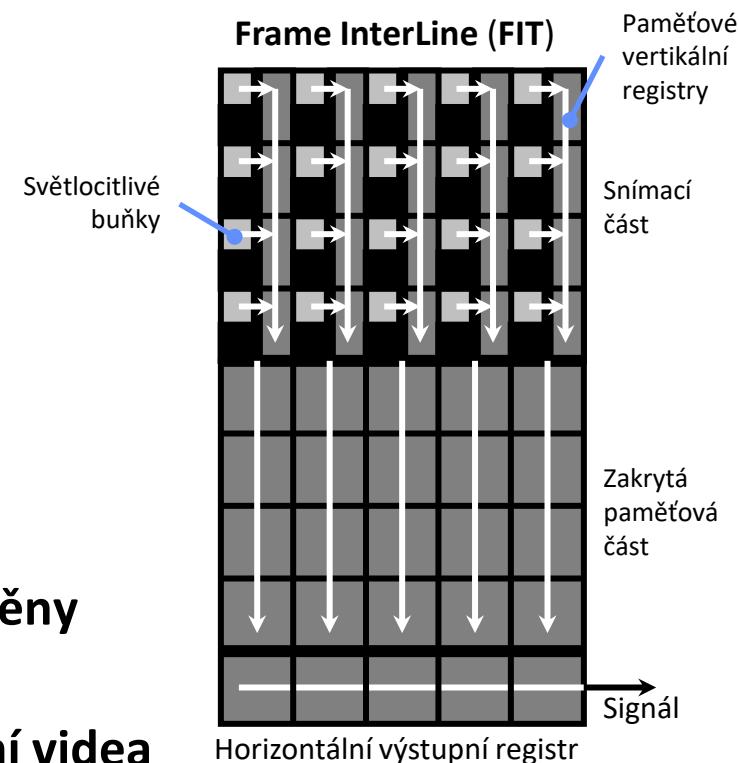
❖ Podle vyčítání obrazové informace

❖ Interline (IL) – meziřádkový přenos

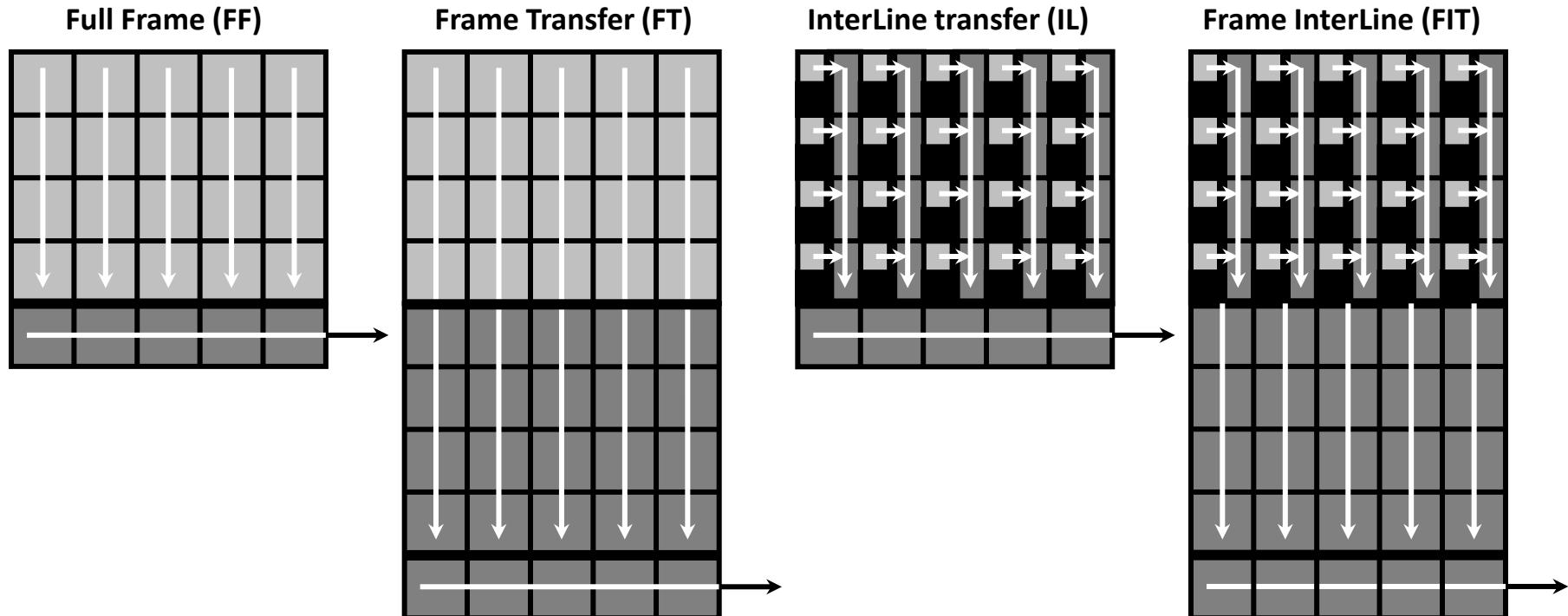
- Snaží se **odstranit nedostatky FT** snímače
- Mezi **sloupce světlocitlivých buněk vloženy paměťové registry**
 - Vertikální **paměťové registry zakryty**
 - **Světlocitlivé buňky a necitlivé buňky registru**
- **Náboj** z posuvných registrů se postupně přesouvá do **horizontálního řádkového registru**
- Vertikální **posuvný registr zakryt**
 - Také **trpí svislým mazáním obrazu** (vertical smear)
 - Při **silném osvětlení** vnikají fotony **hluboko do substrátu**
- Vyvolají **vznik volných nosičů** a ty pronikají do **posuvných registrů nezakrytou stranou**



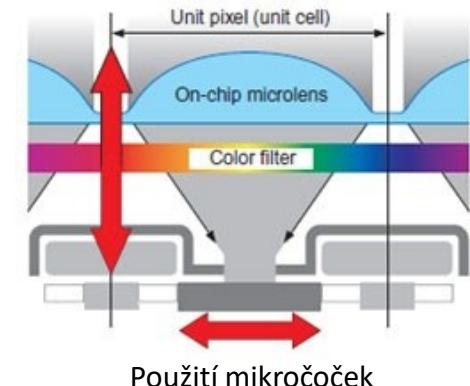
- Různé typy snímacích prvků CCD
 - ❖ Podle vyčítání obrazové informace
 - ❖ Frame-Interline (FIT) – kombinace FT a IL
 - Odstraňuje svislé mazání při nadměrném jasu
 - Paměťová část i svislé posuvné registry
 - Horní registr – pro elektronickou závěrku
 - Vliv nežádoucího náboje proti IL struktuře výrazně potlačen
 - Dáno poměrem doby trvání půlsnímku a zatemňovacího intervalu
 - V paměťové části jsou náboje zcela chráněny proti vlivu nežádoucího osvětlení
 - Nejpokročilejší struktura CCD pro snímání videa



- Různé typy snímacích prvků CCD
 - ❖ Podle vyčítání obrazové informace
 - Full Frame (FF) – s přenosem po řádcích
 - Field Transfer (FT) – s (půl)snímkovým přenosem
 - Interline (IL) – s meziřádkovým přenosem
 - Frame-Interline Transfer (FIT) – kombinace FT a IL



- Odvozené pokročilé struktury CCD
 - ❖ Skutečná **struktura CCD** je proti schématům složitější
 - ❖ Prvek musí obsahovat **řadu pomocných hradel**
 - Řídicí hradla, oddělovací hradla, čtecí hradla, hradla pro **odvod přebytečného náboje**,...
 - Tato hradla **zmenšují plochu** světlocitlivých prvků a tím i **citlivost snímače**
 - Fill Factor (FF) – poměr světlocitlivé a celkové plochy
 - ❖ Například **technologie HAD** (Hole Accumulated Diode)
 - Dioda **akumulující díry**
 - Na polovodičovém substrátu N je nanesena **vrstva P**
 - Obsahuje **hradlo k odvádění přebytečného náboje**
 - **Zvýšení aktivní plochy**
 - ❖ Technologie **Hyper HAD**
 - Miniaturní čočka nad každou buňkou
 - Snížení ztráty světla a zvýšení citlivosti



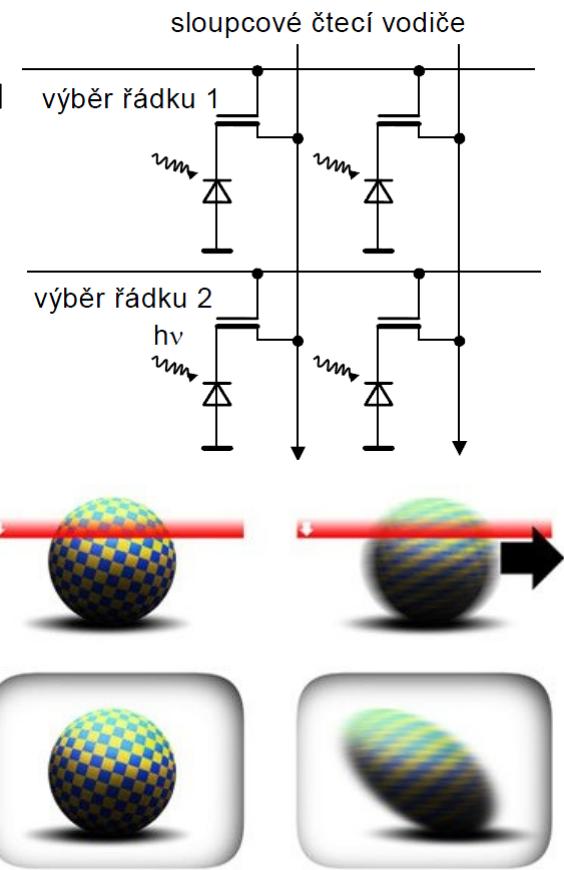
□ Snímací prvky CMOS

❖ Spínané matice fotodiod

- Světlem akumulovaný signál z matice fotodiod je přepínán přes pole adresovatelně spínaných CMOS tranzistorů
- Adresovatelné čtení dle libovolného algoritmu

❖ Základní typy CMOS senzorů

- PPS (Passive Pixel Sensor)
- APS (Active Pixel Sensor)
 - Lze implementovat **zesilovač** a další obvody v rámci buňky
- **Výhody proti CCD**
 - Nižší cena, není mazání obrazu (**smear**), menší spotřeba, ...
- **Nevýhody proti CCD**
 - U prvních generací **CMOS** horší šumové poměry
 - „Rolling shutter“ vs „Global shutter“



Illustrace efektu „rolling shutter“

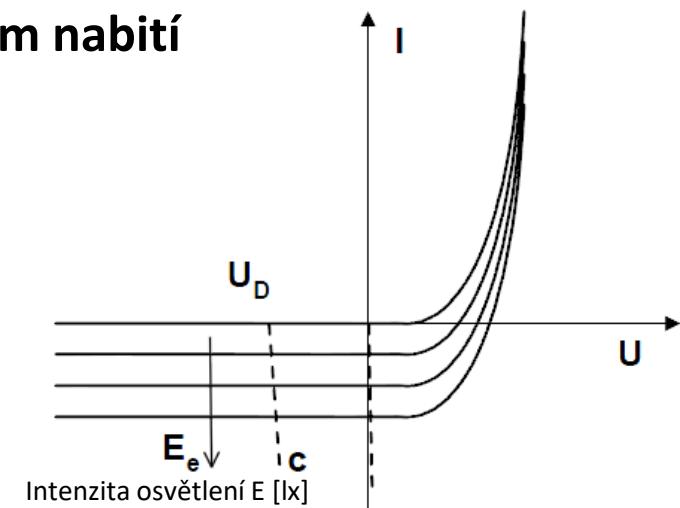
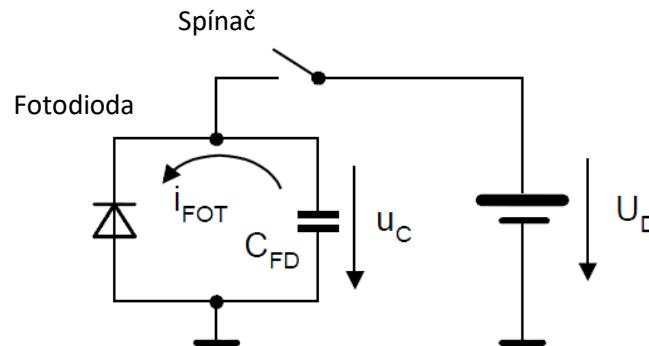
□ Snímací prvky CMOS

❖ Základní funkce fotodiody

- Ve 3. kvadrantu voltampérové charakteristiky
 - (1) Přednabití – reset
 - (2) Akumulace náboje – vybíjení
 - (3) Destruktivní čtení – velikost náboje dodaného při resetu je úměrná expozici světelným zářením

❖ Doba akumulace odpovídá periodě čtení

- Elektrický náboj dodaný při opětovném nabití je úměrný expozici



□ Hlavní zdroje šumu v obrazovém snímači

❖ Fotonový šum (photon noise)

- Plyne z **kvantové podstaty světla**
- **Střednímu počtu dopadajících fotonů odpovídá** určitý počet fluktuujících šumových fotonů
- Velikost **fotonového šumu** se mění s **velikostí signálu** (signálově závislý)
- Fotonový šum je **fyzikálně daný limit** pro odstup signálu od šumu **SNR**

❖ Tepelný šum jako proud za tmy (dark current)

- Tepelně generované páry elektron-díra u **neosvětleného** snímače
- Snížení proudu za tmy **efektivním hlazením** (hlavně vědecké aplikace)

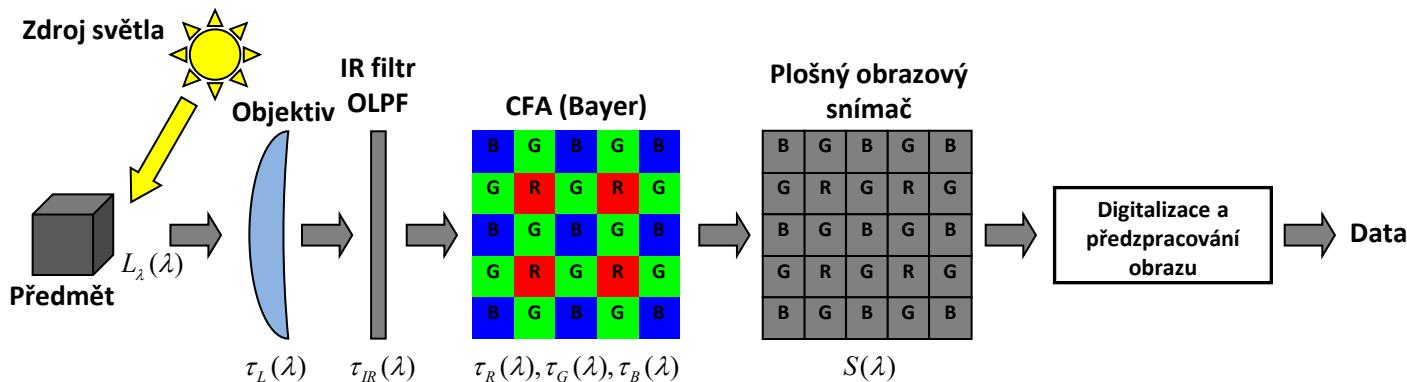
❖ Šum s pevným prostorovým vzorem (fixed pattern noise)

- Dán **rozdílnou citlivostí jednotlivých fotocitlivých elementů**
- **Proud za tmy a šum s pevným prostorovým** lze dobře korigovat

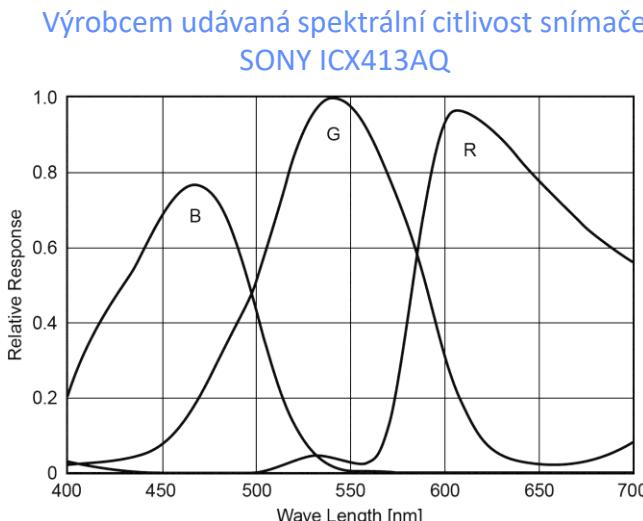
❖ Vlastní šumy obvodů senzoru

□ Základní schéma snímání obrazu

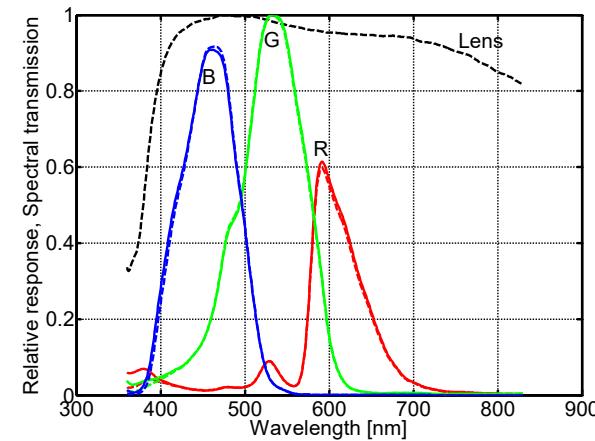
❖ Kamera s optikou, barevným filtrem a snímačem obrazu



- Příklad spektrální citlivosti barevných kanálů obrazového snímače



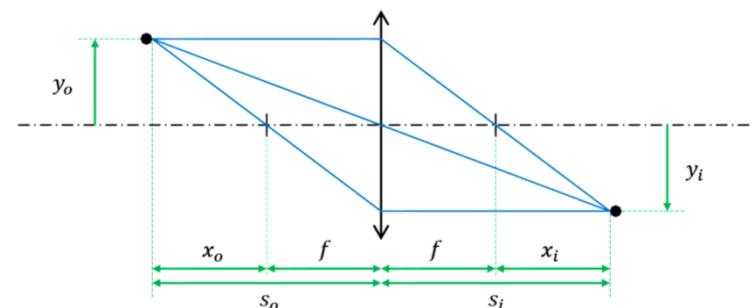
Změřené spektrální charakteristiky pro
Nikon D70



□ Objektiv kamery

❖ Opakování základní optiky

- Zjednodušení **zobrazení pro tenkou čočku**
 - Aproximace pro **tenkou čočku**



– Zobrazovací rovnice

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f} \text{ (Gauss), } x_o x_i = f^2 \text{ (Newton)}$$

– Příčné zvětšení

$$\frac{y_i}{y_o} = -\frac{s_i}{s_o} = -\frac{f}{x_o} = -\frac{x_i}{f}$$

– s_o, s_i - předmětová a obrazová vzdálenost

– y_o, y_i - vzdálenost předmětu a obrazu od optické osy

– f – **ohnisková vzdálenost**, platí $x_o = s_o - f$ a $x_i = s_i - f$

□ Postup určení osvitu v rovině snímače

❖ Základní vztah mezi jasem ve scéně a osvitem na snímači

$$H = \frac{\pi \cdot T \cdot v \cdot \cos^4 \theta \cdot L \cdot t \cdot F^2}{4 \cdot A^2 \cdot i^2} + H_f = \frac{q \cdot L \cdot t \cdot F^2}{A^2 \cdot i^2} + H_f$$

- Kde jednotlivé parametry jsou

- **A** - clonové číslo objektivu
- **F** - ohnisková vzdálenost [m]
- **H** - osvit v rovině snímače [lx s]
- **H_f** - parazitní osvit z důvodu rozptylu v [lx s]
- **i** - obrazová vzdálenost [m]
- **L** - jas scény [cd / m²]
- **T** - transparency objektivu [-]
- **t** - expoziční čas [s]
- **v** - faktor vinětace
- **θ** - úhel obrazového bodu mimo osu

Typické hodnoty:

$$H_f \ll H$$

$$T = 90 / 100$$

$$\theta = 10^\circ$$

$$\cos^4 \theta = 94 / 100$$

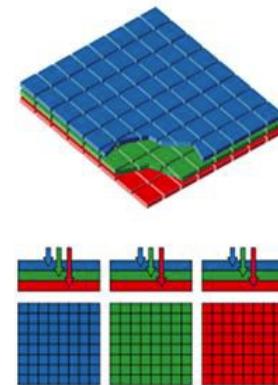
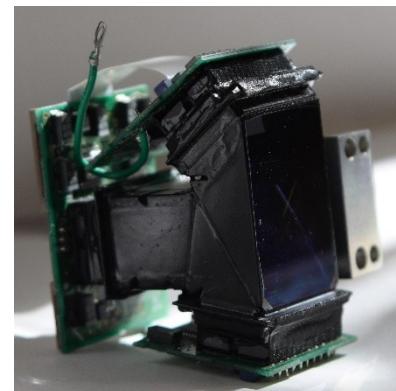
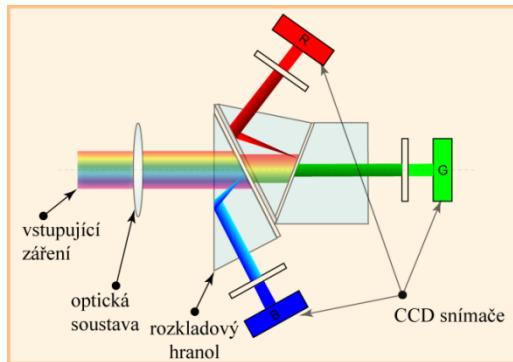
$$v = 98 / 100$$

$$q = \frac{\pi \cdot T \cdot v \cdot \cos^4 \theta}{4} = 65 / 100$$

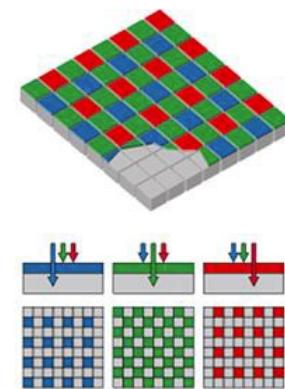
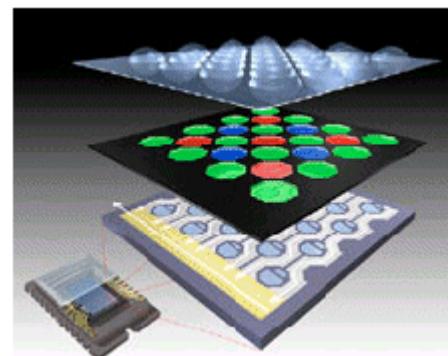
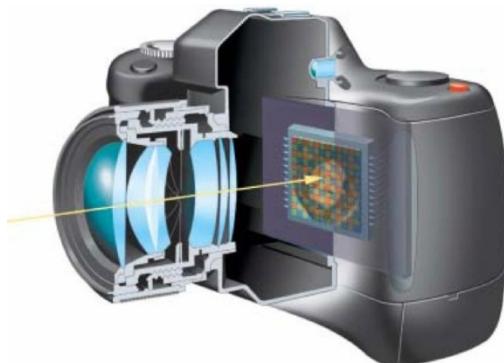
$$H_a = \frac{65L_a t}{100A^2}$$

□ Snímání barevného obrazu

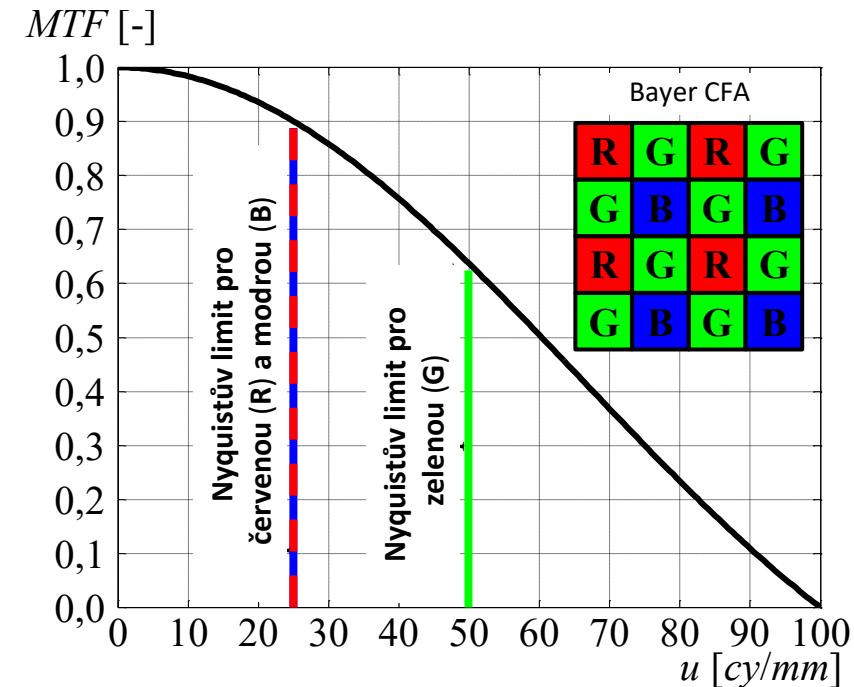
❖ Barvodělící soustava pro 3 snímače



❖ Maska filtrů CFA (Color Filter Array) pro 1 snímač

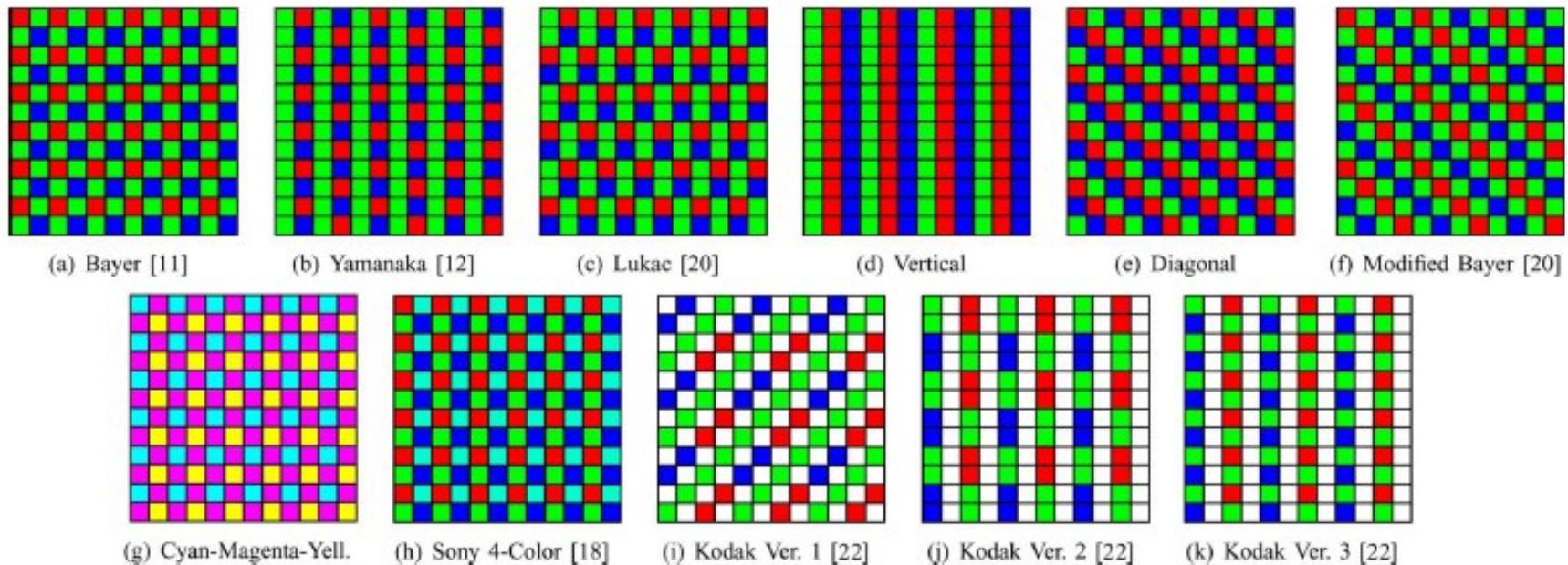


- Možnosti snímání barevné informace
 - ❖ Oddělené obrazové snímače (R, G, B) s **barvodělící soustavou**
 - ❖ Prostorový multiplex filtrů **CFA** (Color Filter Array)
 - ❖ Časový multiplex filtrů (jen pro speciální aplikace)
- Nejčastěji používaná struktura s mosaikovým CFA (**Bayerovým**) filtrem
 - ❖ 2x tolik **zelených** filtrů
 - Informace o jasu scény
 - ❖ Nutnost **interpolace**
 - Informace ze **sousedních bodů**
 - Různé **interpolační metody**
 - ❖ Problém s **aliasingem**
 - Nyquistův kmitočet pro **R** a **G**



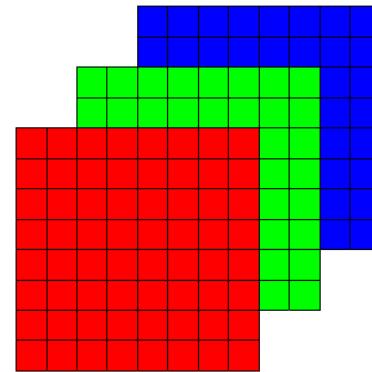
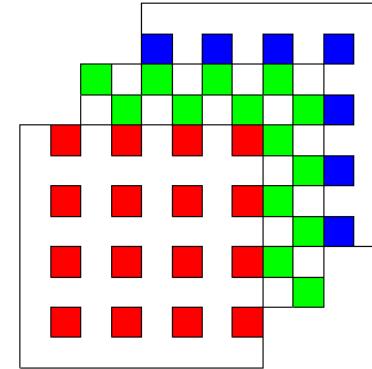
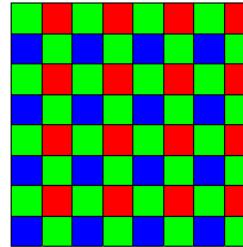
☐ Masky barevných filtrů CFA (Color Filter Array)

- ❖ Existují různé prostorové struktury filtrů
- ❖ Nejčastější je Bayer CFA



□ Interpolace barev

- ❖ Color demosaicing („Debayering“)

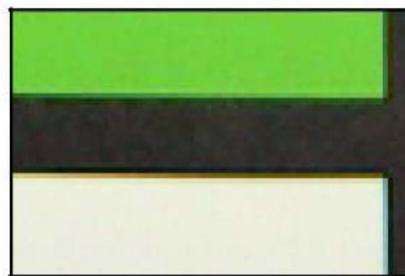


□ Interpolaci artefakty a vliv aliasingu v RB kanálech

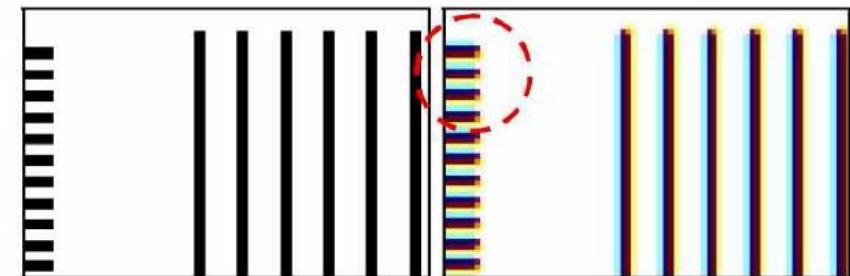
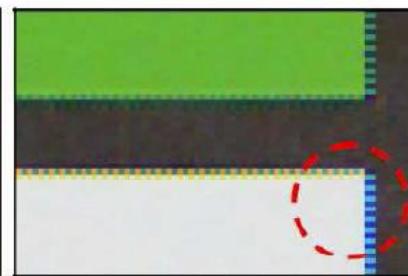


□ Interpolační artefakty

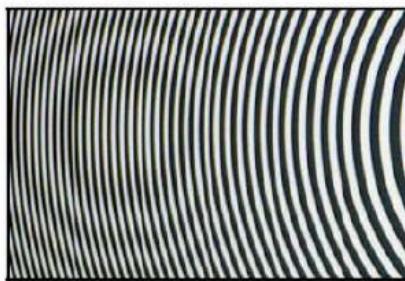
- ❖ Lze potlačit použitím sofistikovaných interpolačních metod



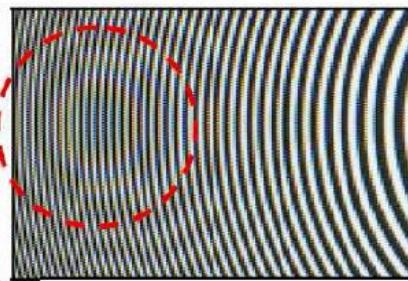
Zkreslení „zip“



Zkreslené barvy



Aliasing

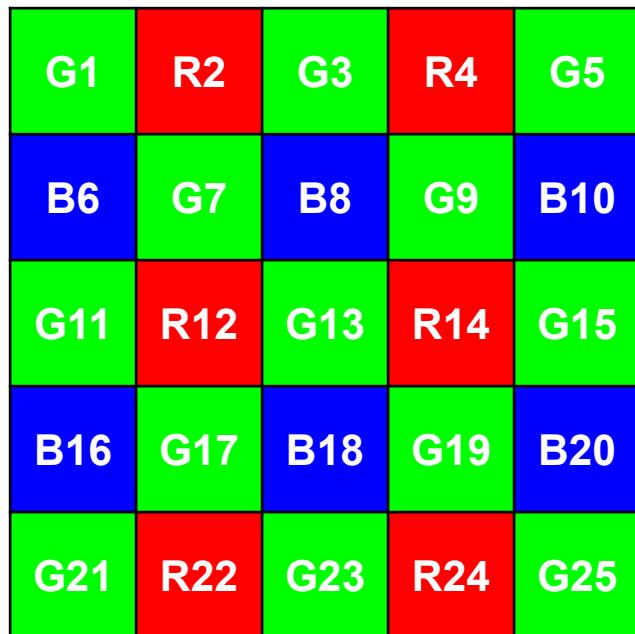


Rozmazání



□ Princip bilineární interpolace barev (demosaicing)

- ❖ Nejjednodušší **interpolační metoda**
- ❖ Bayerova maska (část snímače)



$$G_{12} = \frac{G_7 + G_{11} + G_{13} + G_{17}}{4}$$

$$R_{17} = \frac{R_{12} + R_{22}}{2}, \quad B_{17} = \frac{B_{16} + B_{18}}{2}$$

$$R_{18} = \frac{R_{12} + R_{14} + R_{22} + R_{24}}{4}, \quad B_{12} = \frac{B_6 + B_8 + B_{16} + B_{18}}{4}$$

□ Simulace interpolace barev ve snímku

❖ Simulace rozkladu snímku

- Bayer CFA, základní barvy RGB

❖ Implementace interpolace

- Různé interpolační metody
- Sestavení RGB obrazové matice

❖ Ověření účinnosti interpolace

- Výpočet RMSE nebo jiné vhodné metriky

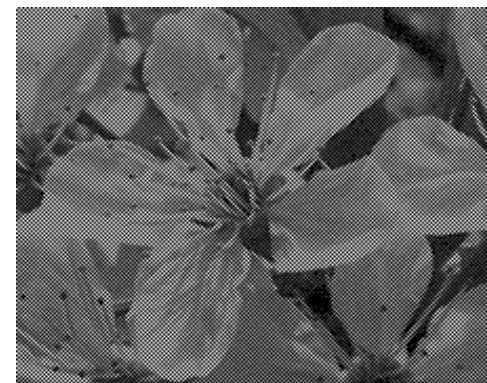
Originál



R



G



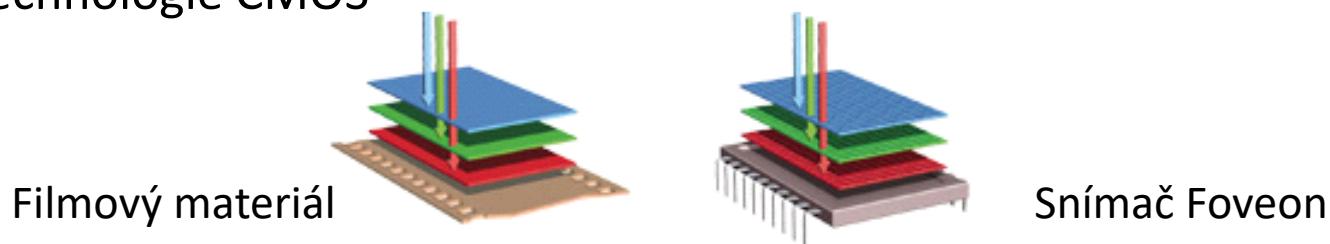
B



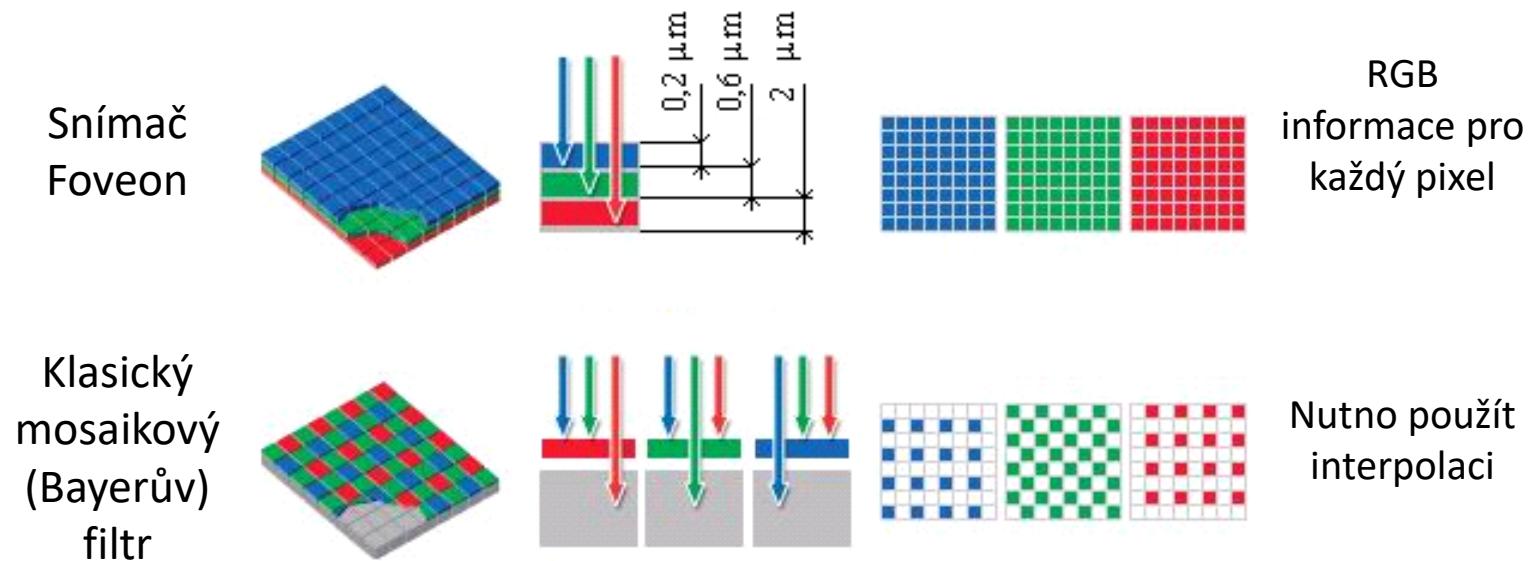
□ Obrazový snímač Foveon X3

- ❖ Uspořádání **do vrstev** podobně jako u filmu

- Technologie CMOS



- ❖ Není třeba interpolovat barevnou informaci

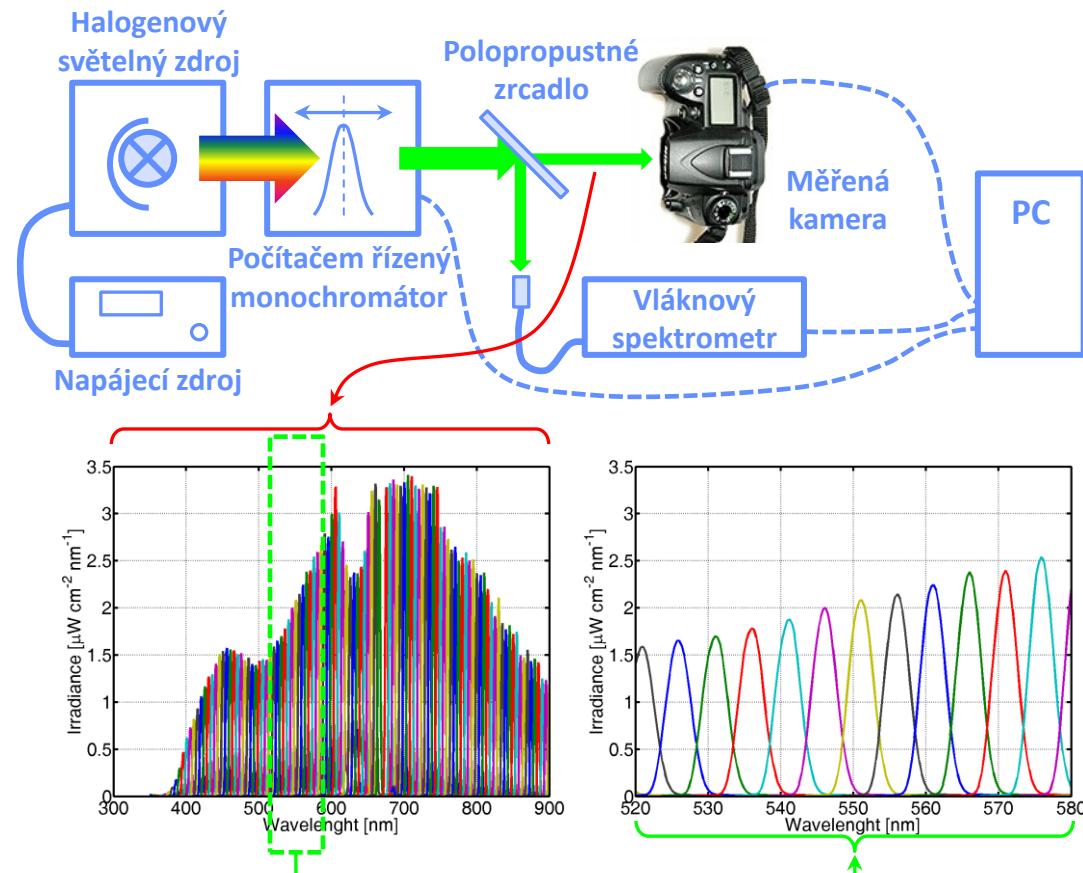
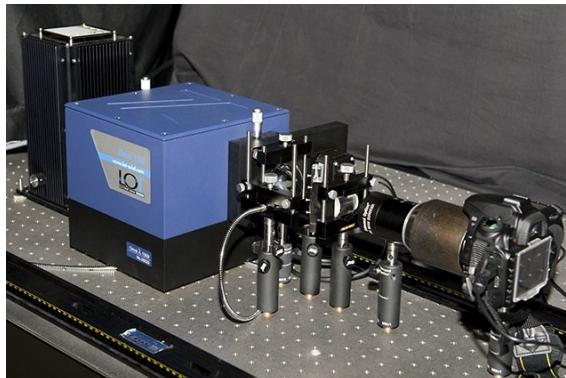


Snímání barevného obrazu

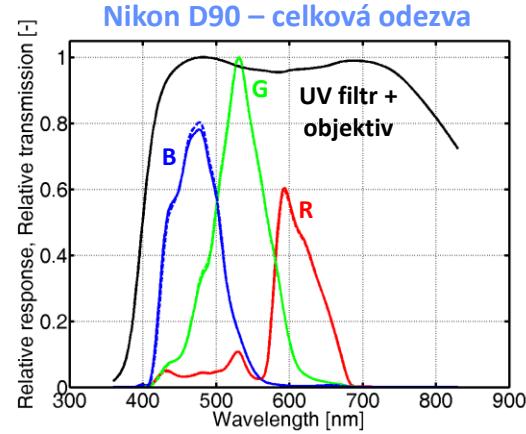
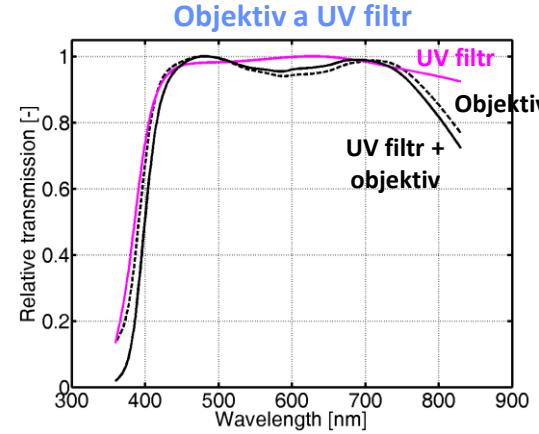
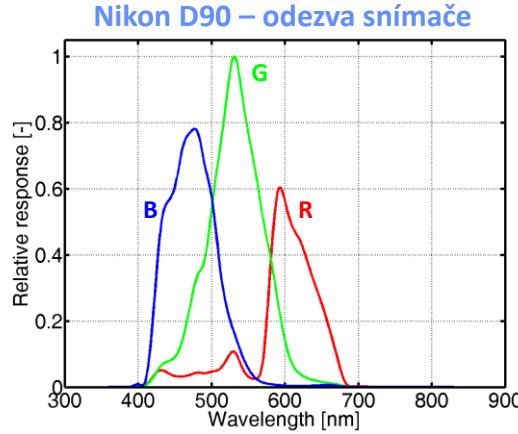
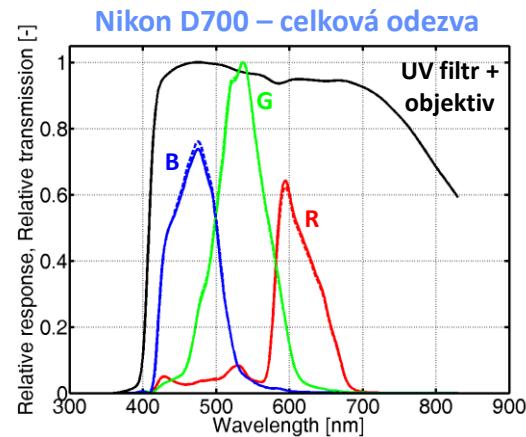
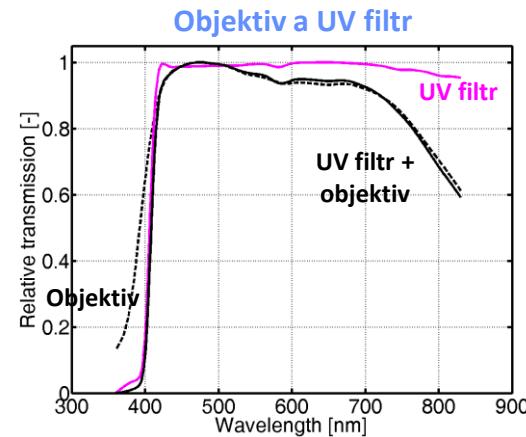
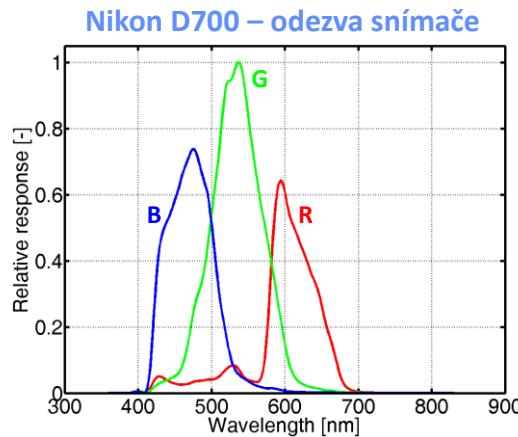
□ Ukázka měření spektrální odezvy barevné kamery

❖ Obvykle nedostupná (důležitá pro přesné použití)

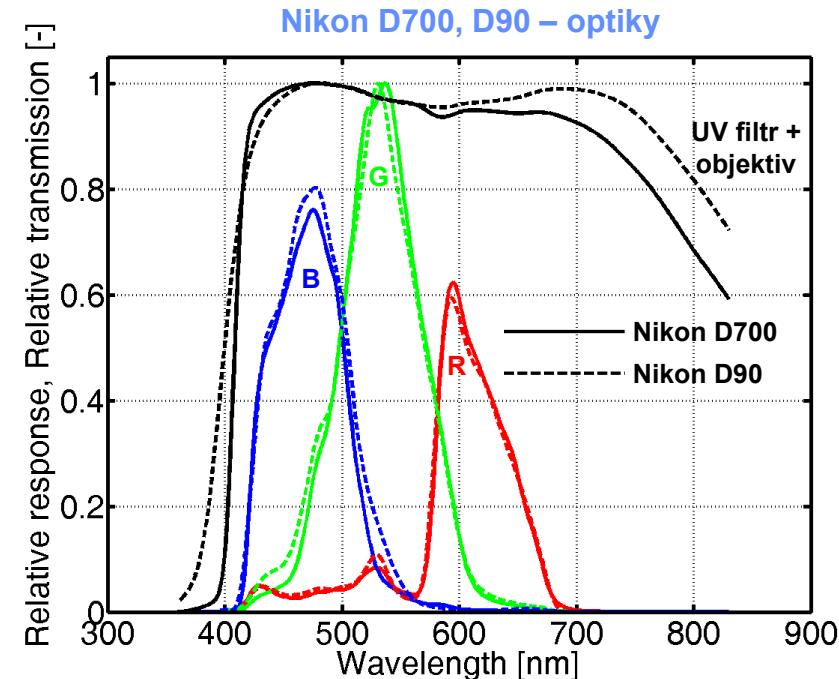
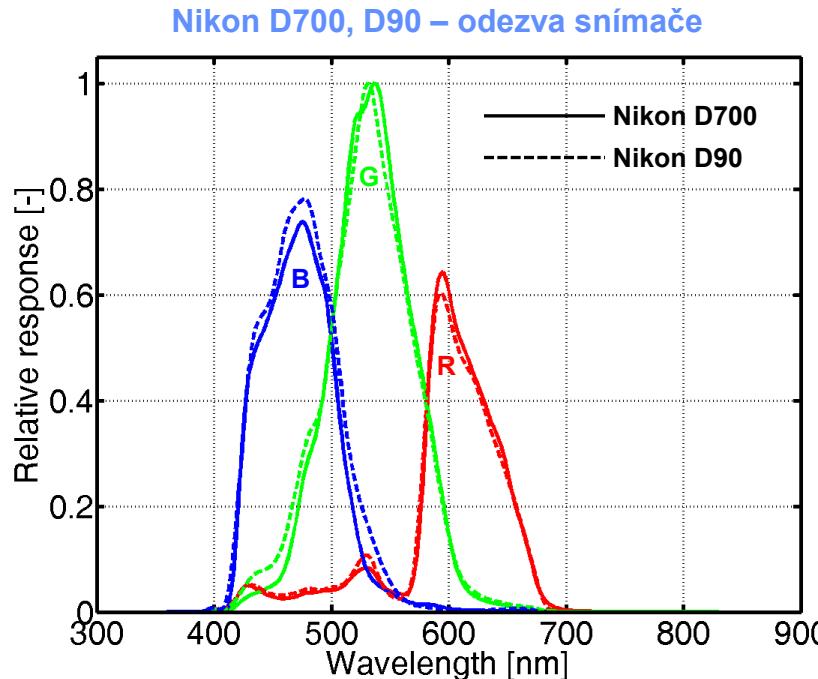
- Měření v optické laboratoři (použití kalibrovaného monochromátoru)



- Ukázka měření spektrální odezvy barevné kamery
 - ❖ Ukázky změřené spektrální odezvy (Nikon D90 a D700)



- Ukázka měření spektrální odezvy barevné kamery
 - ❖ Ukázky změřené spektrální odezvy (Nikon D90 a D700)
 - ❖ Porovnání Nikon D700 a Nikon D90
 - Plné křivky Nikon D700, čárkováně Nikon D90
 - Zanedbatelný rozdíl (použití stejné CFA technologie)

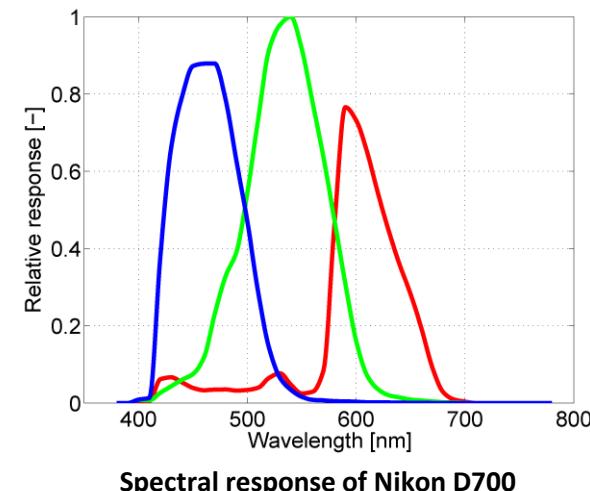
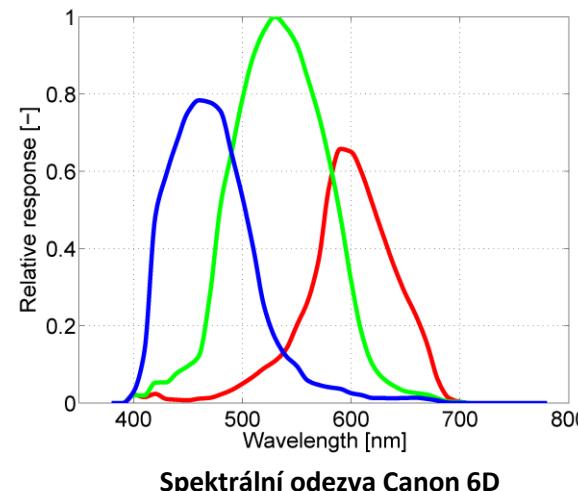
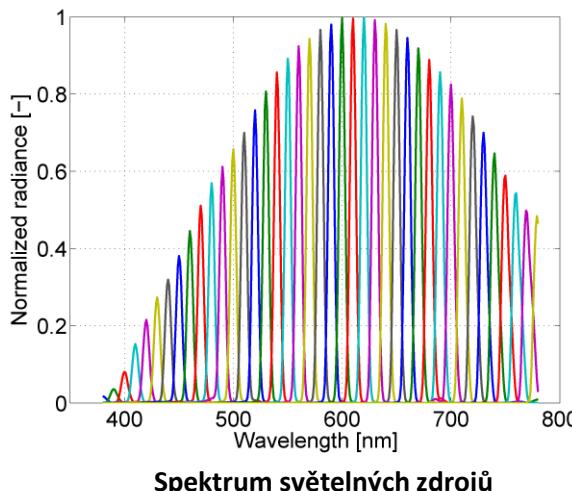


□ Ukázka měření spektrální odezvy barevné kamery

- ❖ Modifikovaná konfigurace na odraz
 - Monochromátor a spektroradiometr
 - Vytvoření úzkých spekter a spektrální složení světla
- ❖ Měření kamer od různých výrobců
 - Výrazný rozdíl v získaných charakteristikách
 - Různí výrobci používají různé filtry
 - Zde porovnání Canon 6D a Nikon D700



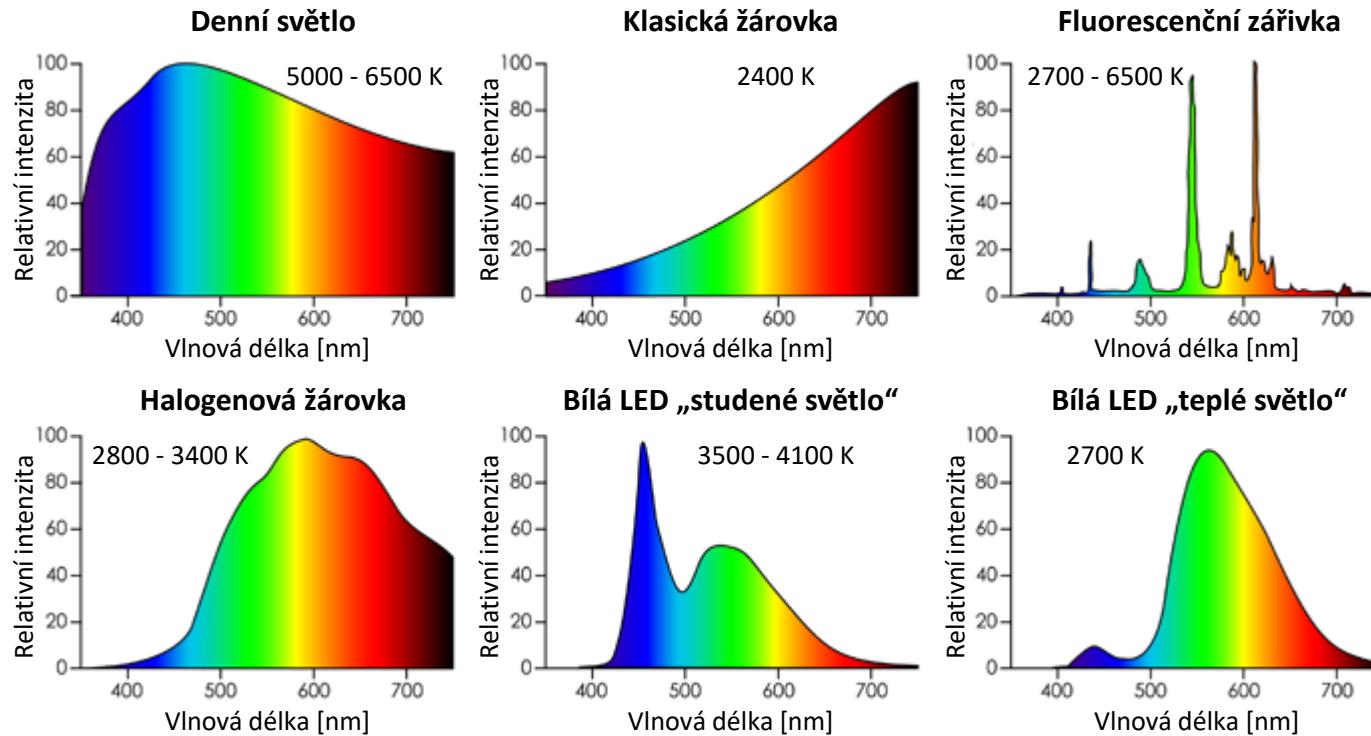
Měření spektrální odezvy



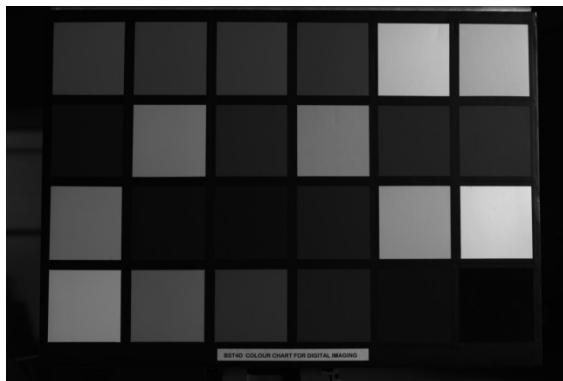
□ Spektra vyzařování různých světelných zdrojů

❖ Různý charakter spektra „bílého světla“

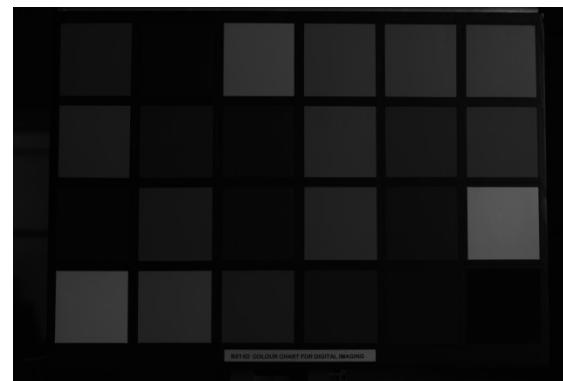
- Znázornění spekter světelných zdrojů a teplota chromatičnosti CCT
- Důležitá charakteristika index podání barev CRI (Color Rendering Index)



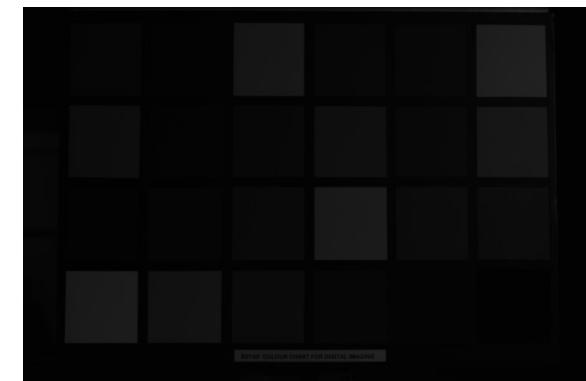
- Barevný obraz a využití bílé WB (White Balance)
 - ❖ Barevné kanály a složený barevný obraz
 - Příklad obrazu v kanálech R, G, B při nasvícení halogenovou žárovkou



Halogen – 3 000 K – Red



Halogen – 3 000 K – Green



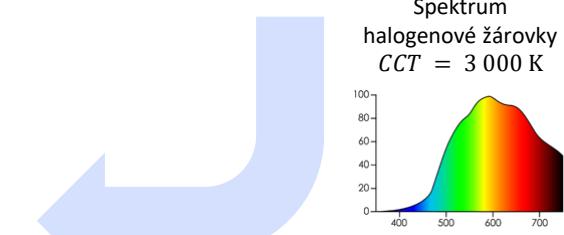
Halogen – 3 000 K – Blue



Referenční obrazec



Halogen – 3 000 K – RGB



Přímé složení barevné obrazové matice bez aplikace metod využití bílé (WB)

❑ Barevný obraz a vyvážení bílé WB (White Balance)

❖ Nejjednoduší metoda vyvážení bílé WB

- Algoritmus „šedý svět“ **GW** (Gray World)
 - Průměrná odrazivost scény je přibližně achromatická – R, G, a B stejná odezva
 - Popis nejjednoduší **WG** **GW** škálování bez chromatické adaptace

$$R_{avg} = \frac{1}{M N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N R(m, n), \quad G_{avg} = \frac{1}{M N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N G(m, n), \quad B_{avg} = \frac{1}{M N} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N B(m, n)$$

– Zisk pro kanály **R** a **B**

$$\alpha_R = \frac{G_{avg}}{R_{avg}}, \quad \alpha_B = \frac{G_{avg}}{B_{avg}}$$

– Aplikace **vyvážení bílé** na **jednotlivé kanály**

$$R_{WB}(m, n) = \alpha_R R(m, n), \quad G_{WB}(m, n) = G(m, n), \quad B_{WB}(m, n) = \alpha_B B(m, n)$$

❖ Další sofistikované metody vyvážení bílé

- Vyhledání objektů ve scéně s jasně bílou (určení bílého bodu)
- Pokročilé modelování vlastností světelných zdrojů

<https://web.stanford.edu/~sujason/ColorBalancing/grayworld.html>

❑ Barevný obraz a vyvážení bílé WB

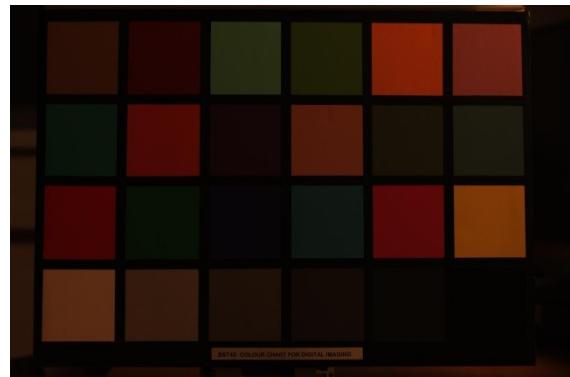
❖ Ukázka aplikace algoritmu vyvážení bílé (WB)



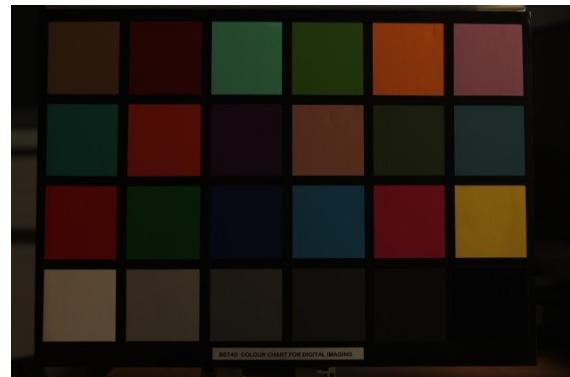
Referenční obrazec



Halogen – 3 000 K – RGB



LED – 3 200 K – RGB



LED – 5 400 K – RGB



Aplikace automatického vyvážení bílé (WB) metodou šedý svět (GW)

WB GW (Halogen – 3 000 K – RGB)



WB GW (LED – 3 200 K – RGB)



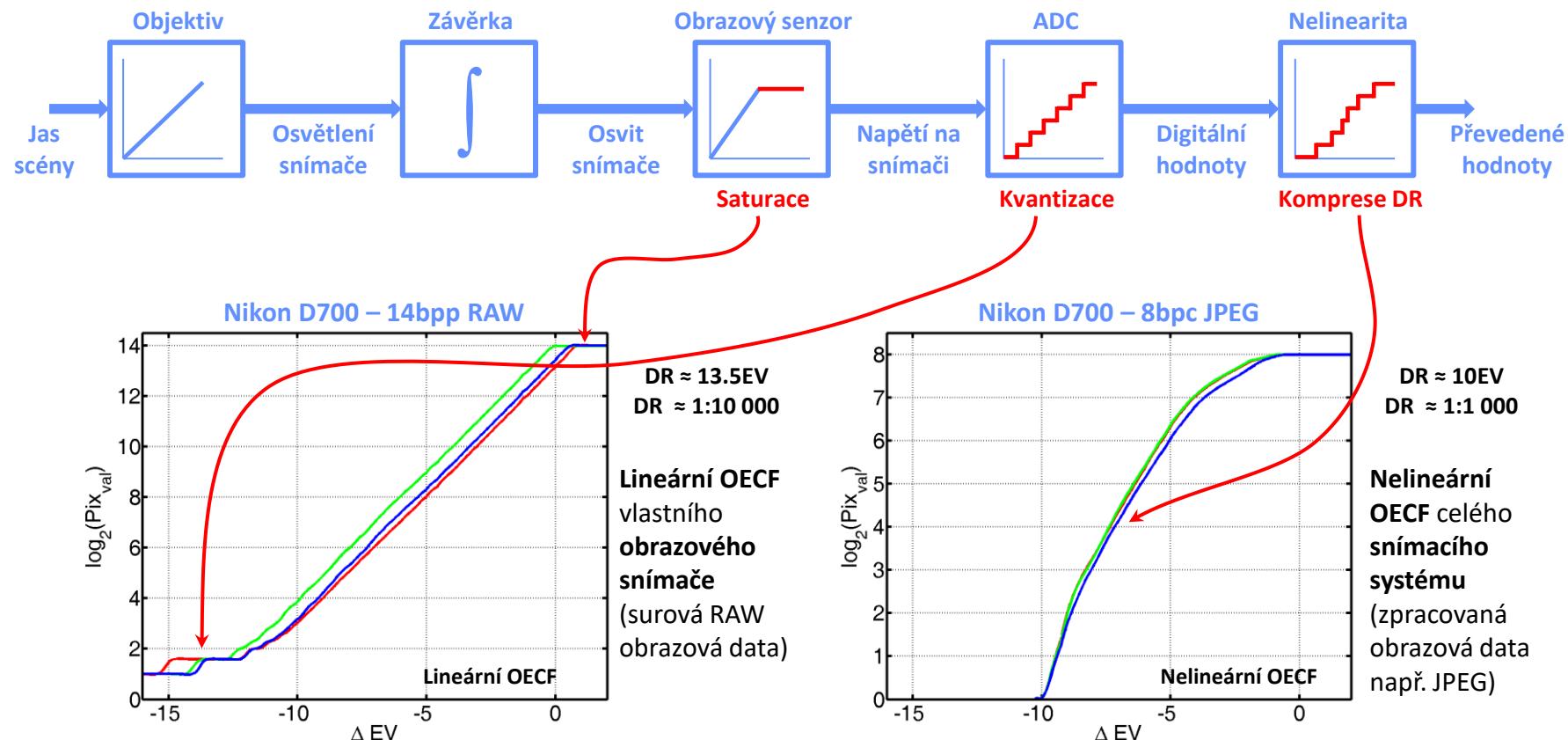
WB GW (LED – 5 400 K – RGB)



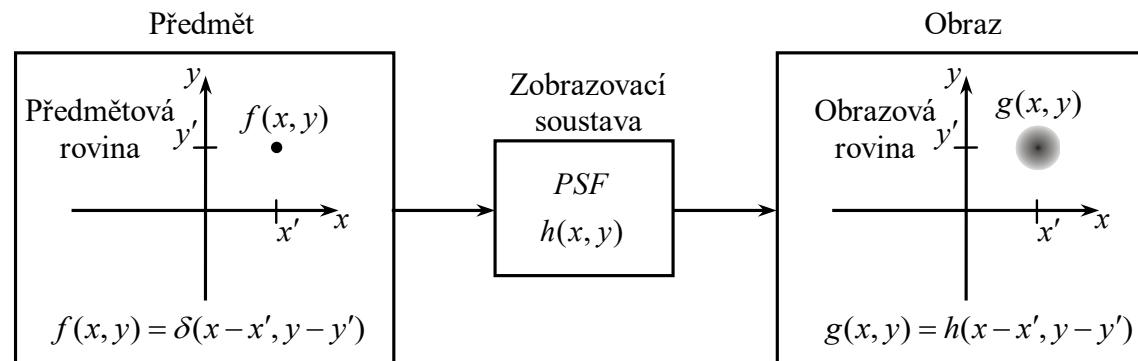
❑ Vliv jednotlivých částí snímací soustavy

❖ Nelineární převodní charakteristika

- OECF (Opto-Electronic Conversion Function)
- Digitální kamera – snímací řetězec



- Lineární systém (Linear system)
 - ❖ Systém je **lineární** pokud platí **princip superpozice**
- Prostorově invariantní systém (Shift Invariant)
 - ❖ Posuv na vstupu způsobí stejný posuv na výstupu
- Prostorová impulsová odezva PSF pro LSI soustavy
(Point Spread Function)



- ❖ Odezva soustavy na dvourozměrný Diracův impuls
 - 2D systém ve spojitém prostoru a 2D konvoluce

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) = \int_{\mathbb{R}^2} f(\alpha, \beta) h(x - \alpha, y - \beta) d\alpha d\beta$$

□ Optická přenosová funkce zobrazovací soustavy

❖ Označuje se jako **OTF (Optical Transfer Function)**

- Odpovídá 2D **Fourierovu obrazu PSF**

$$OTF \equiv \mathcal{F}[h(x, y)] = |H(u, v)| e^{j\phi(u, v)}$$

❖ Výpočet **2D Fourierovy transformace** ve spojitém prostoru

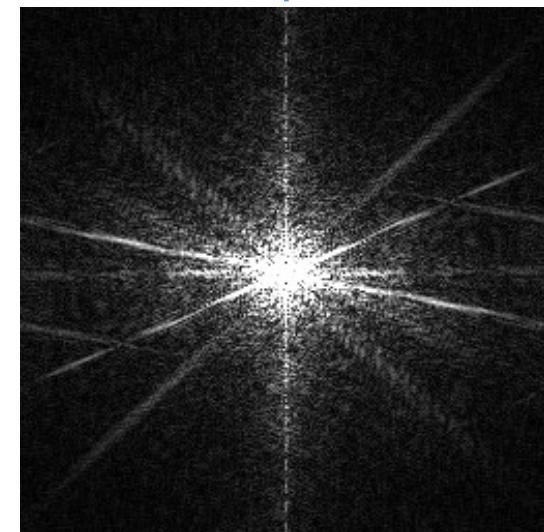
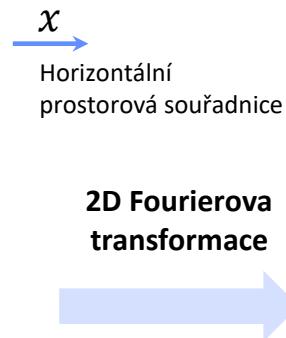
$$H(u, v) = \mathcal{F}[h(x, y)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) e^{-j(ux+vy)} dx dy$$

Obraz jako
2D distribuce
intenzity
 $f(x, y)$



Vertikální
prostorová
souřadnice
 y

Vstupní obraz



Amplitudové
spektrum

Amplitudové
2D spektrum
obrazu
 $|F(u, v)|$

u
Horizontální
prostorový
kmitočet

- Optická přenosová funkce zobrazovací soustavy
 - ❖ Odpovídá 2D Fourierovu obrazu PSF

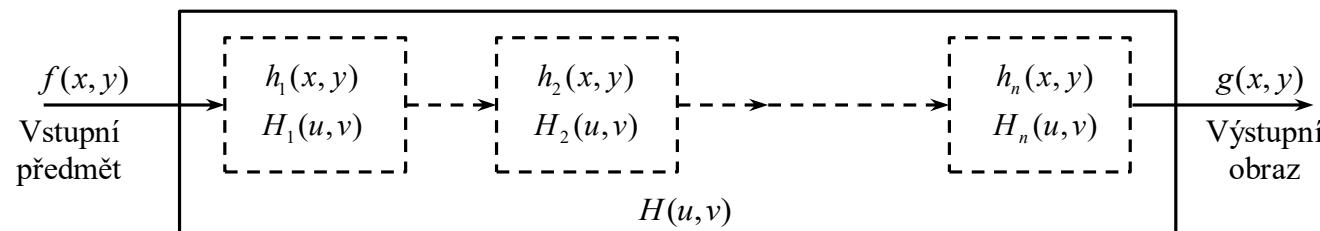
$$OTF \equiv \mathcal{F}[h(x, y)] = |H(u, v)| e^{j\phi(u, v)}$$

- ❖ Aplikace konvolučního teorému
 - Konvoluce přechází v součin spekter

$$\begin{aligned} g(x, y) &= f(x, y) * h(x, y) \\ G(u, v) &= F(u, v) H(u, v) \end{aligned}$$

- ❖ Celková OTF složené zobrazovací soustavy je dána součinem

$$H(u, v) = H_1(u, v) \cdot H_2(u, v) \cdot \dots \cdot H_n(u, v)$$



□ Modulační přenosová funkce MTF

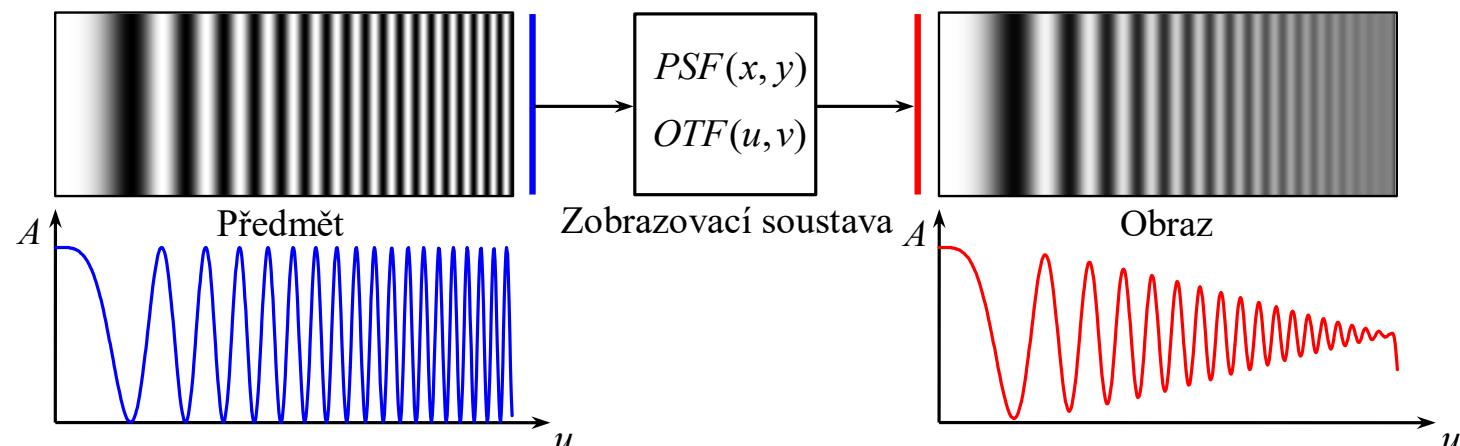
(Modulation Transfer Function)

- ❖ Odpovídá **modulu obecně komplexní OTF**

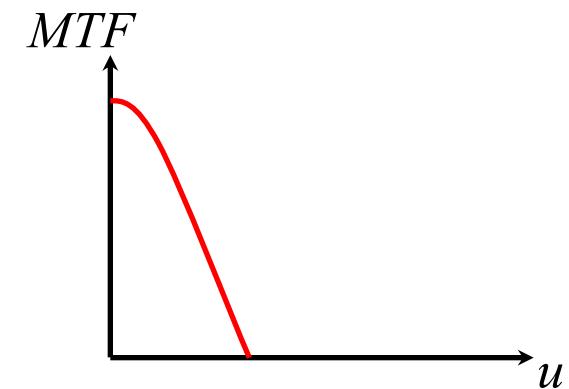
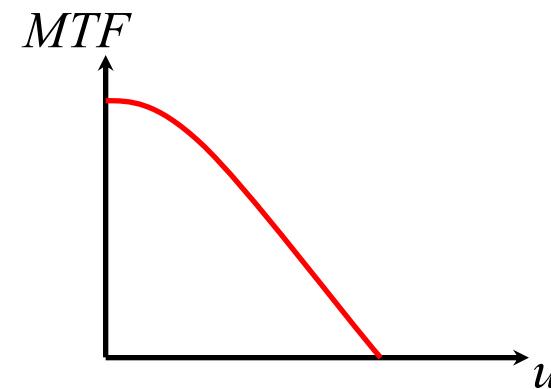
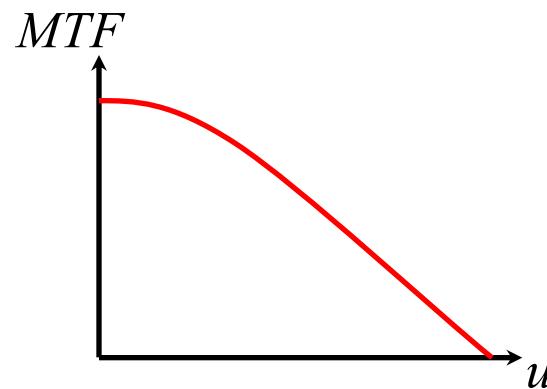
$$MTF \equiv |H(u, v)|$$

- ❖ MTF odpovídá **poměru kontrastu na výstupu soustavy a kontrastu na vstupu**

$$M = \frac{A_{max} - A_{min}}{A_{max} + A_{min}} = \frac{ac}{dc} \Rightarrow MTF(u, v) = \frac{M_o(u, v)}{M_i(u, v)}$$



□ Ukázka vlivu omezení spektra úzkou MTF

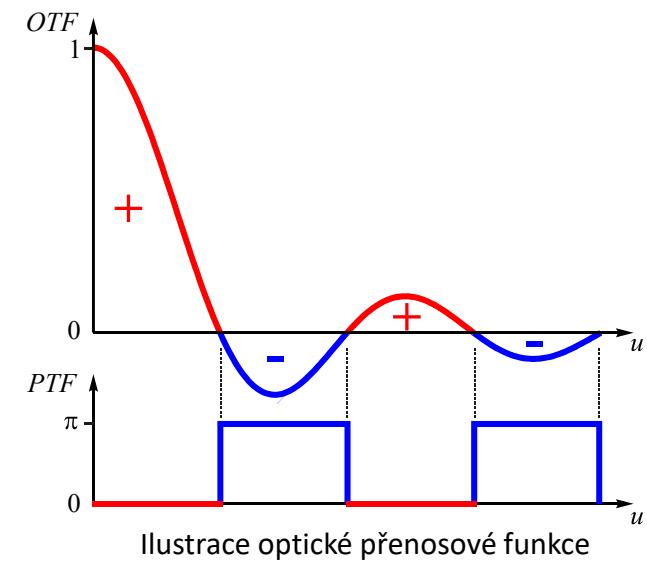
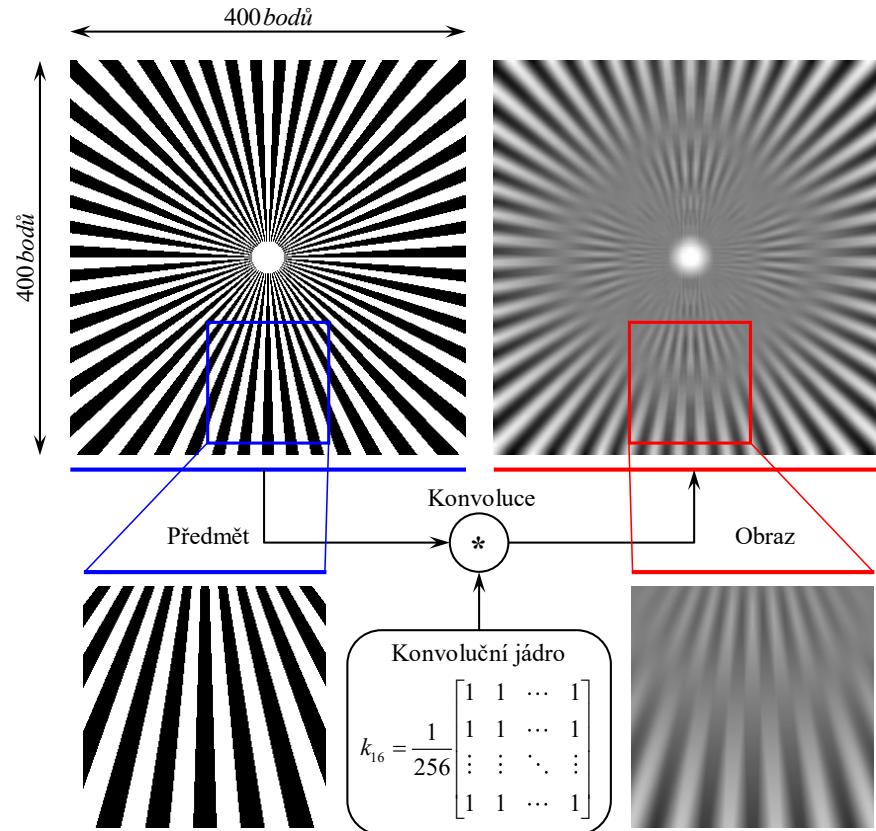


□ Ukázka vlivu tvaru OTF a PTF na obraz

❖ Fázová přenosová funkce PTF (Phase Transfer Function)

- Odpovídá argumentu komplexní OTF

$$PTF \equiv \angle H(u, v) = \phi(u, v)$$



□ Různé definice prostorového kmitočtu

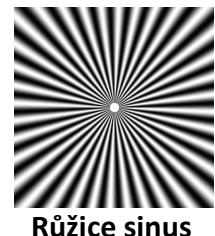
❖ Prostorové a vzorkovací periody ve směru os

$$X, Y, \Delta x, \Delta y [\text{m}, \text{mm}]$$



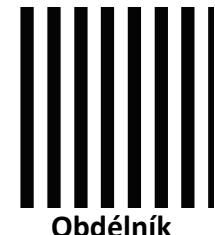
❖ Prostorové kmitočty ve směru souřadných os

$$u_x = \frac{1}{X}, u_y = \frac{1}{Y} [\text{cy/m}, \text{cy/mm}, \text{lp/m}, \text{lp/mm}]$$



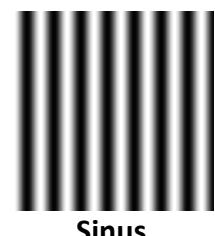
❖ Prostorové kmitočty v radiánech

$$\omega_x = \frac{2\pi}{X} = 2\pi u_x, \omega_y = \frac{2\pi}{Y} = 2\pi u_y [\text{rad/m}, \text{rad/mm}]$$



❖ Normované (diskrétní) prostorové kmitočty

$$\Omega_x = \frac{2\pi}{X} \Delta x, \Omega_y = \frac{2\pi}{Y} \Delta y [\text{rad}]$$

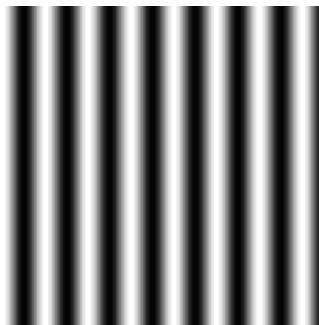


❖ Normované kmitočty na výšku obrazu a na pixel

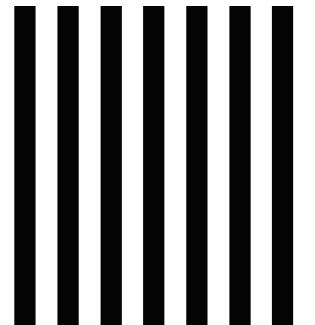
$$u_x = \frac{2H}{X}, u_y = \frac{2H}{Y} [\text{lwph}]$$

$$u_x = \frac{\Delta x}{X}, u_y = \frac{\Delta y}{Y} [\text{cy/pix}]$$

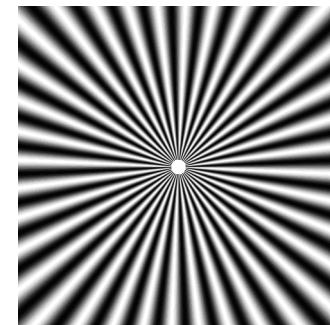
□ Různé definice prostorového kmitočtu



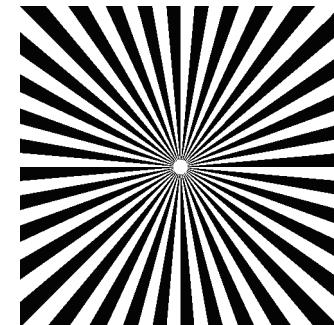
Sinus



Obdélník



Růžice sinus



Růžice obdélník

□ Prostоровý a просторовý úhlový kmitočet

❖ Prostоровé периоды

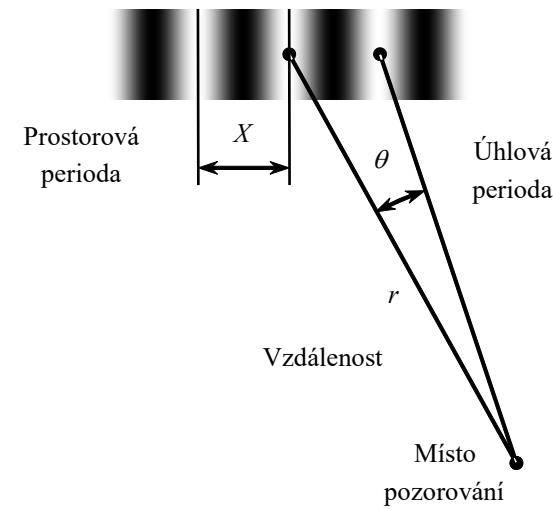
$$X, Y[m]$$

❖ Prostоровé kmitočты

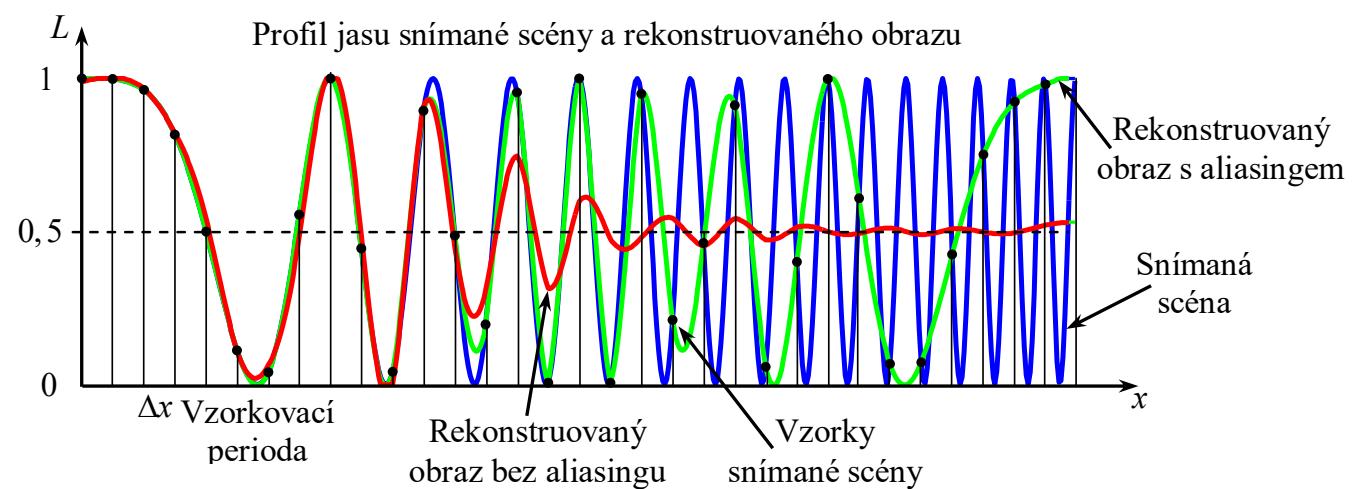
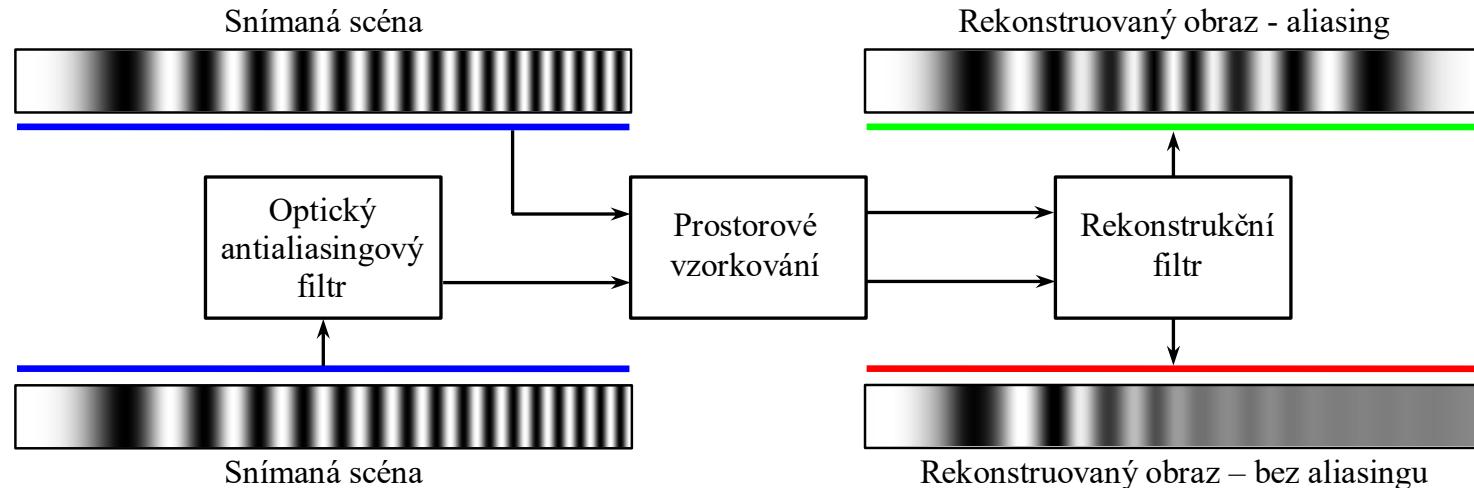
$$u = \frac{1}{X}, \quad v = \frac{1}{Y} [cy/m]$$

❖ Úhlový просторовý кмиточт

$$u_a = \frac{r}{X} = r u \quad [cy/rad] \rightarrow [cy/\text{deg}]$$



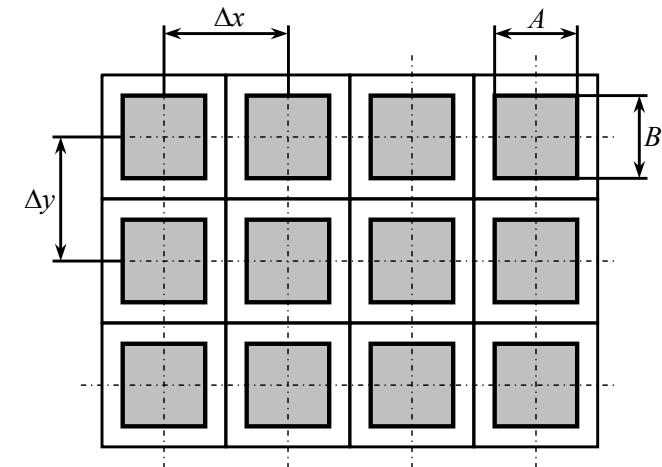
□ Demonstrace nedostatečně hustého vzorkování



□ Vzorkování obrazového pole přímo na snímači

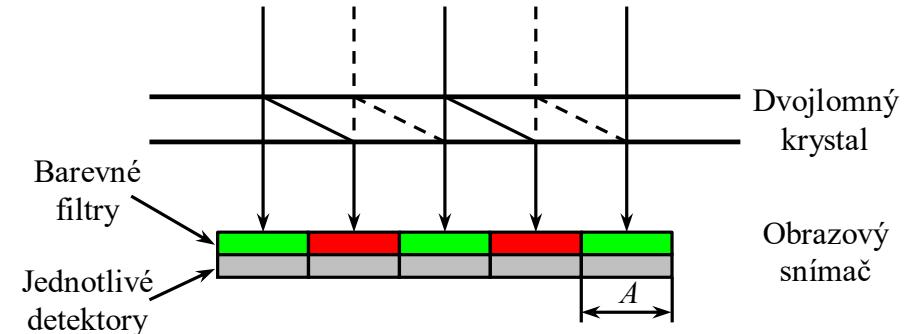
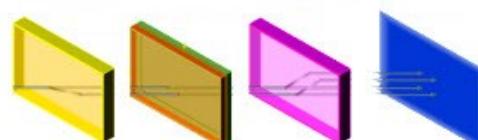
❖ Nyquistova (Shannonova, Kotělnikova,...) vzorkovací podmínka

- $\Delta x, \Delta y$ – vzorkovací perioda
- **Maximální prostorový kmitočet** splňující vzorkovací podmínku
0,5 cy/pix



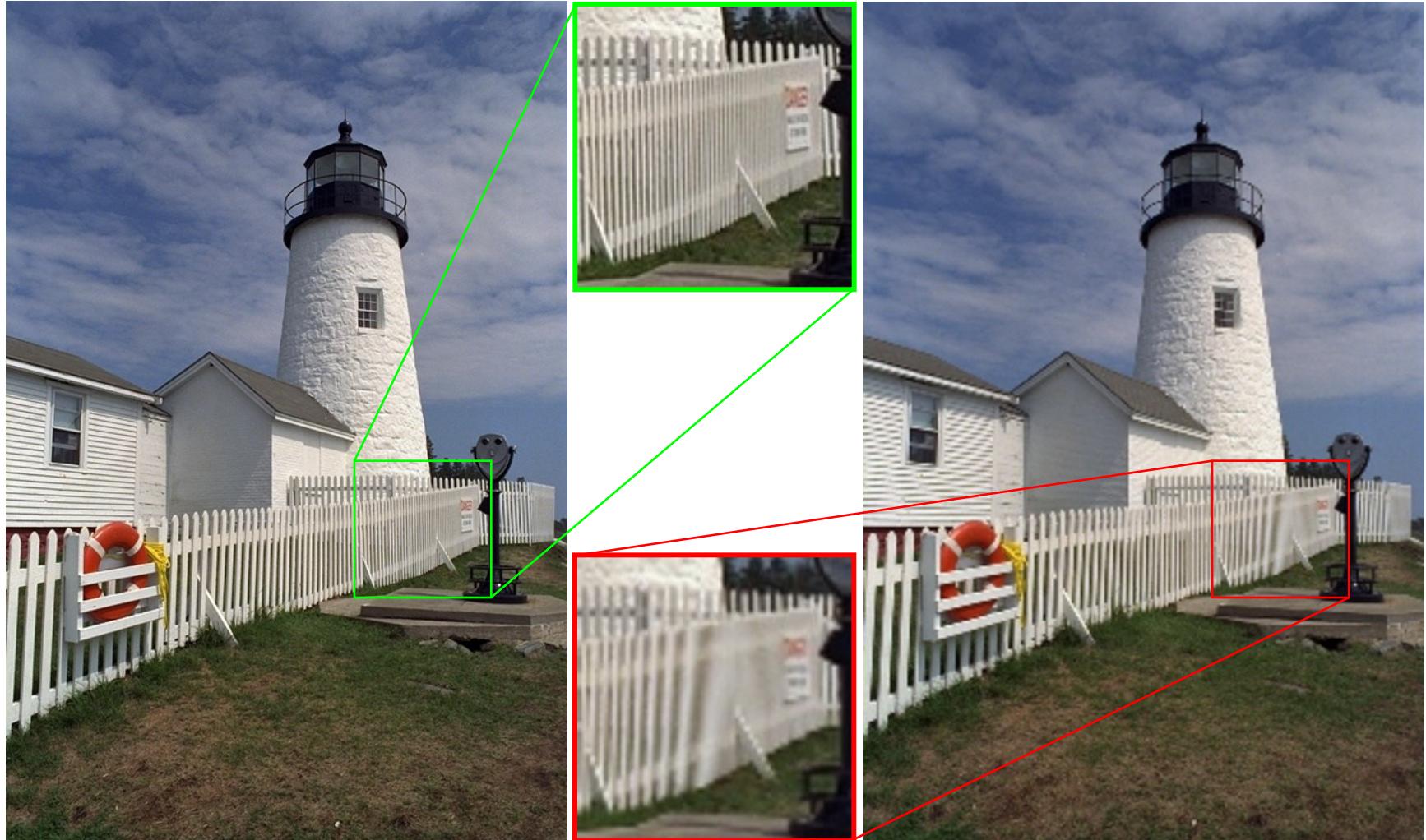
□ Splnění vzorkovací podmínky

- ### ❖ Zkreslení se nazývá aliasing (v obrazové technice moiré)
- Nutné použít antialiasingový filtr (dolní propust)
 - **OLPF** (Optical Low-Pass Filter)



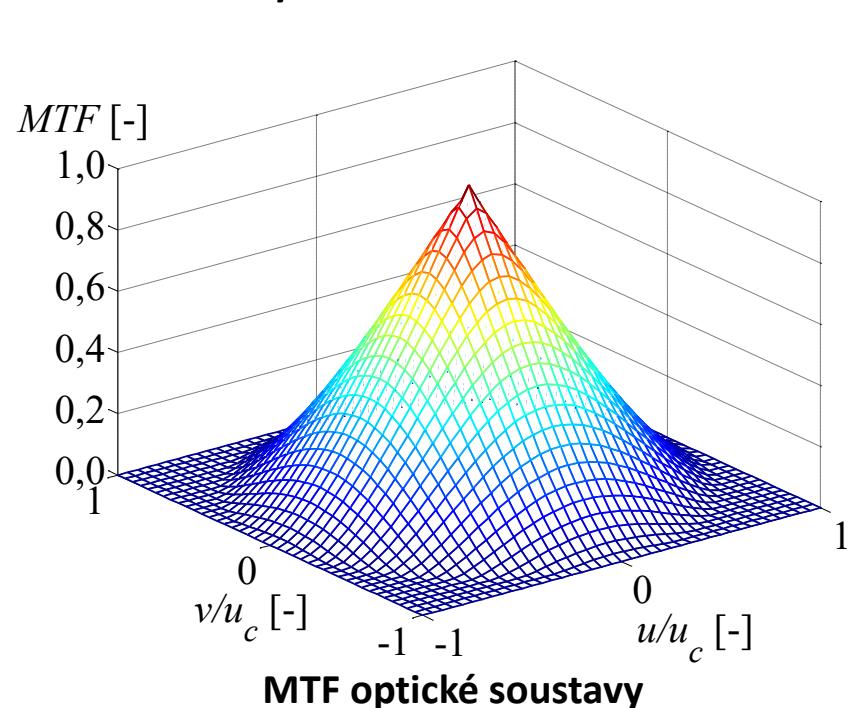
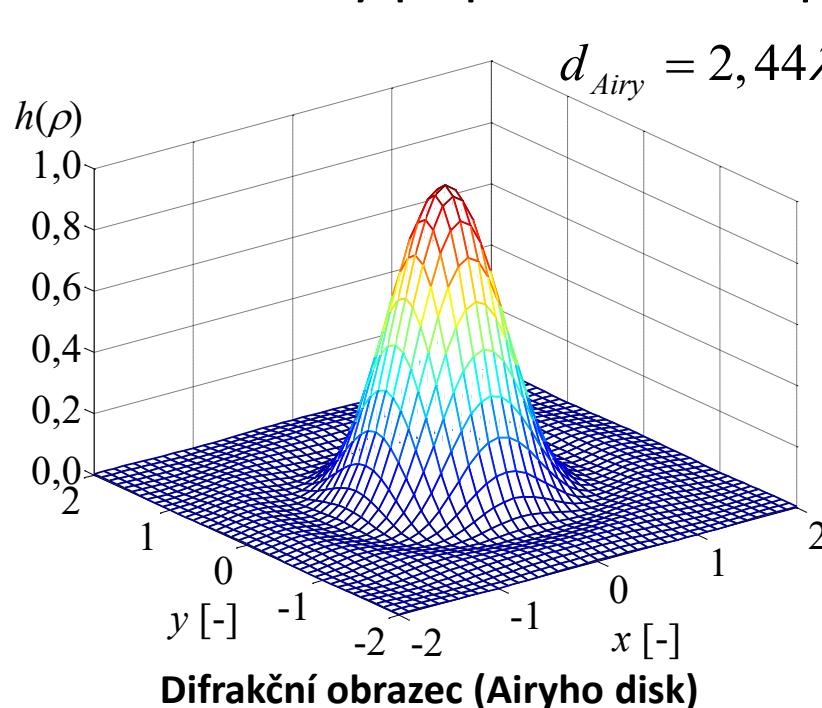
Charakteristiky snímačů

- Ukázka nedostatečného vzorkování – aliasing (moiré)



❑ Jednoduchý model MTF ideální optické soustavy

- ❖ Často se uvažuje pouze rozostření obrazu vlivem difrakce - **diffraction limited**
- ❖ Modelový případ ideální optické soustavy - **difrakční MTF**



❑ Přizpůsobení optické soustavy a detektoru

- Průměr Airyho disku menší než detektor
- Průměr Airyho disku větší než detektor

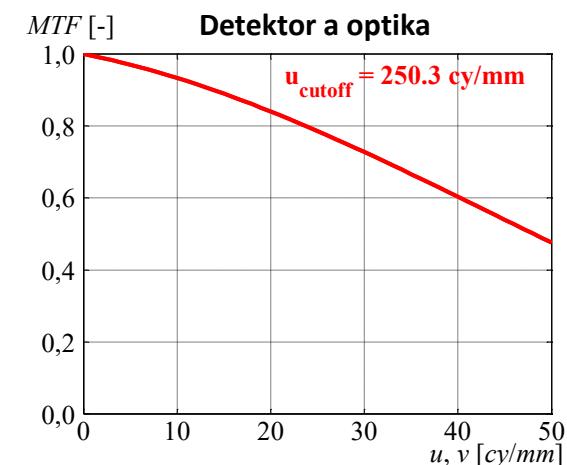
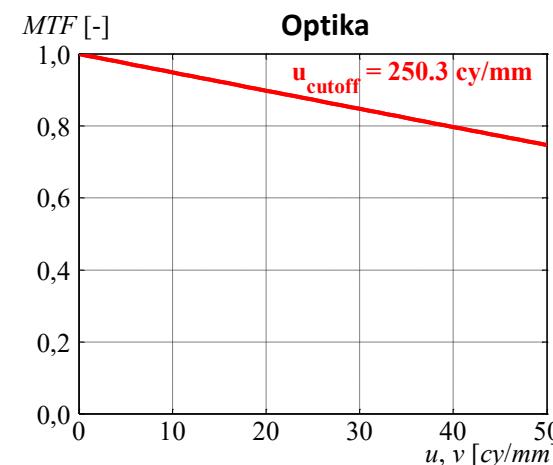
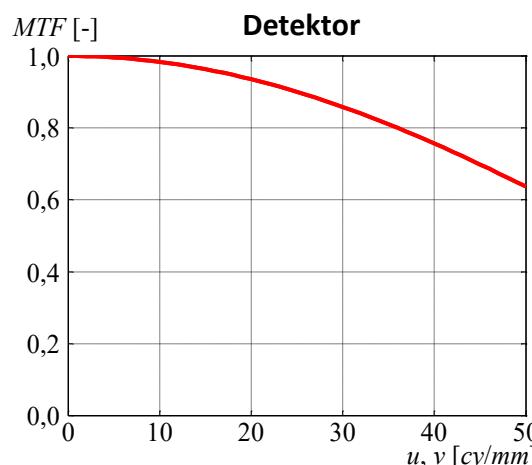
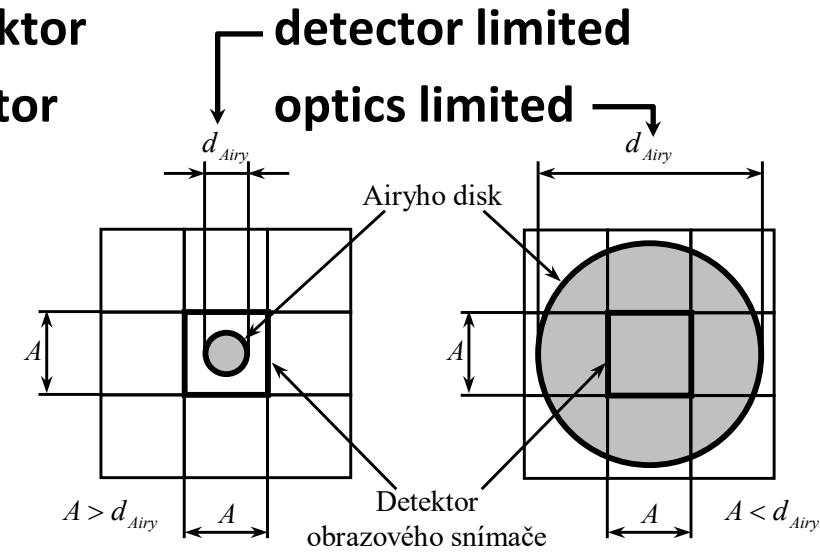
❖ Airyho disk 84% energie

$$d_{\text{Airy}} = 2,44 \lambda \frac{f}{D}$$

❖ Modelové parametry

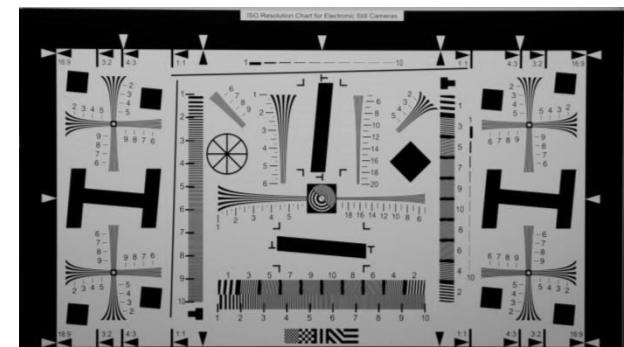
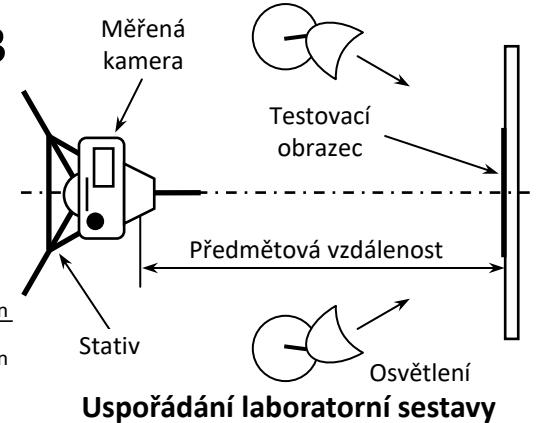
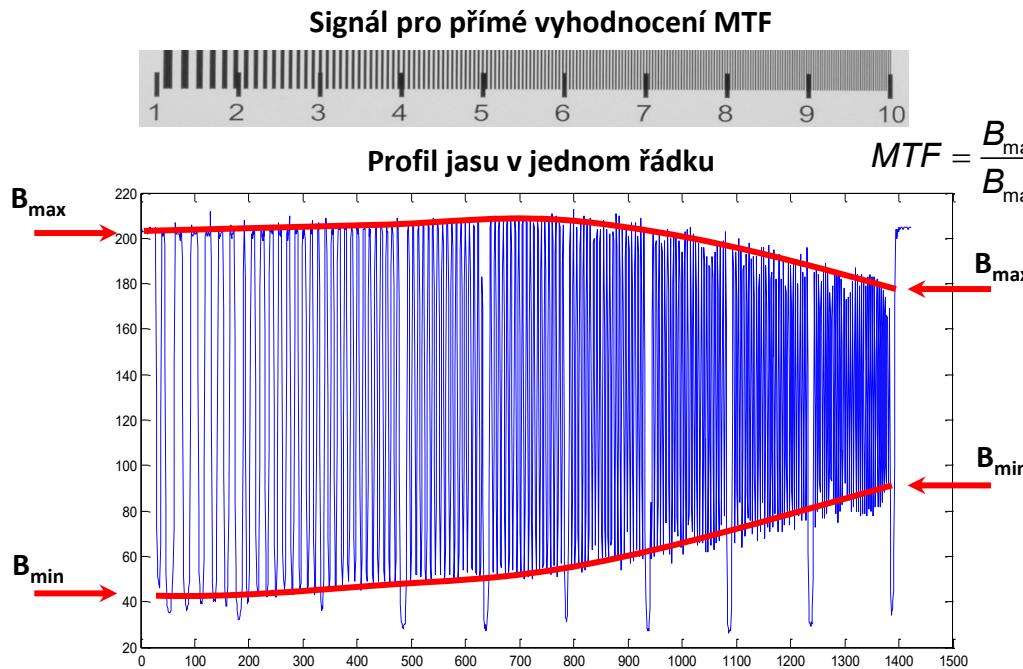
$$A = 10 \mu\text{m}; f = 19,6 \text{mm}; D = 3 \text{mm};$$

$$\lambda = 600 \text{nm} \Rightarrow d_{\text{Airy}} = 9,75 \mu\text{m}$$



Charakteristiky snímačů

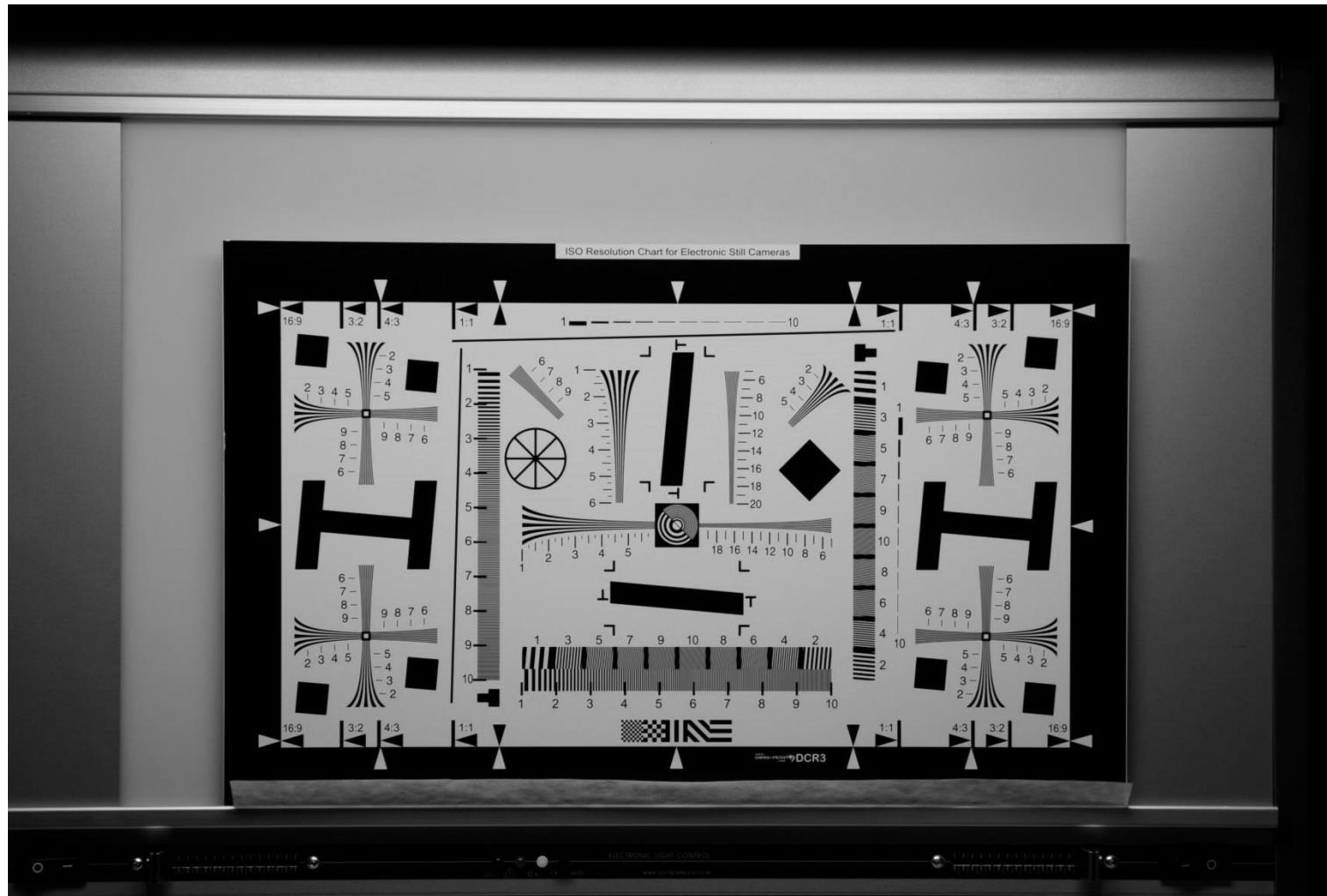
- Mezinárodní standard pro měření parametrů DF
 - ❖ ISO 12233 Photography – Electronic still-picture cameras – resolution measurement
 - Měření **rozlišovací schopnosti** digitálních fotoaparátů
 - Testovací obrazec podle **doporučení ISO 12233**
 - **Speciální signály** pro přímé vyhodnocení



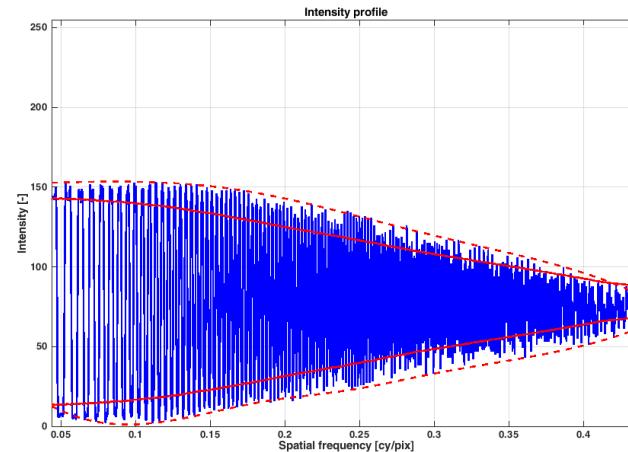
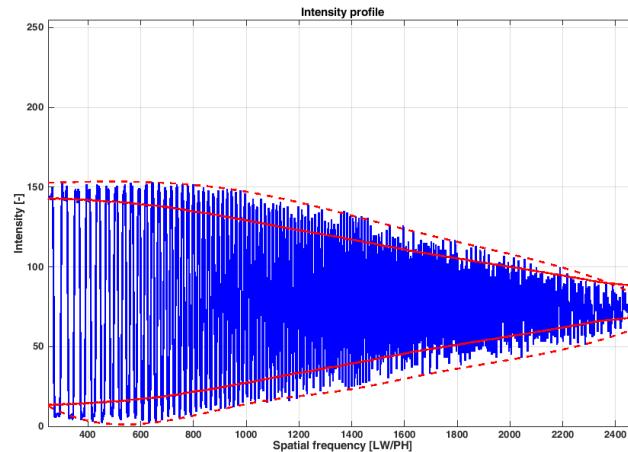
Ukázka testovacího obrazce podle ISO 12233

Charakteristiky snímačů

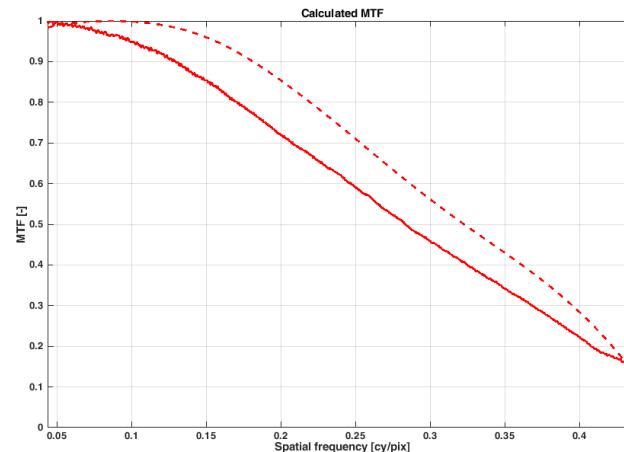
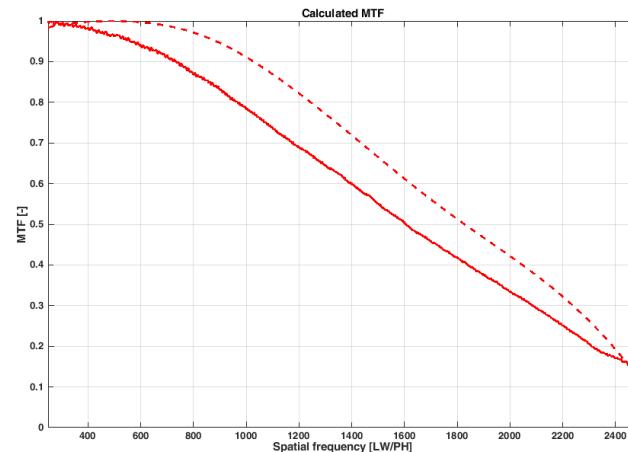
- Mezinárodní standard pro měření parametrů DF
 - ❖ Základní reflexní obrazec ISO 12233 (Danes-Picta DCR3)



- Mezinárodní standard pro měření parametrů DF
 - Ukázka vyhodnocení MTF z přeladovaného signálu



$$MTF = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}}$$



Použitá a doporučená literatura

- Poynton, C. **Digital Video and HDTV Algorithms and Interfaces**, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2003.
- Boreman, G. D. **Modulation transfer function in optical and electro – optical systems**, SPIE PRESS, 2001.
- Gaskill, J. D. **Linear systems, Fourier transform, and optics**, Wiley, 1978.
- Pavlidis, G. **Foundations of Photography: A Treatise on the Technical Aspects of Digital Photography**, Springer, 2022.
- Nakamura, J. **Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras**, CRC, 2005.
- ISO 12233:2017, Photography – Electronic still picture imaging – Resolution and spatial frequency responses.
- Fliegel, K. **Modeling and measurement of image sensor characteristics**, Radioengineering, 2004.



Audiovizuální technika

Děkuji za pozornost!

