

KAPITOLA 2 ZÁKLADY SPRACOVANIA OBRAZU

2.1 SVETLO

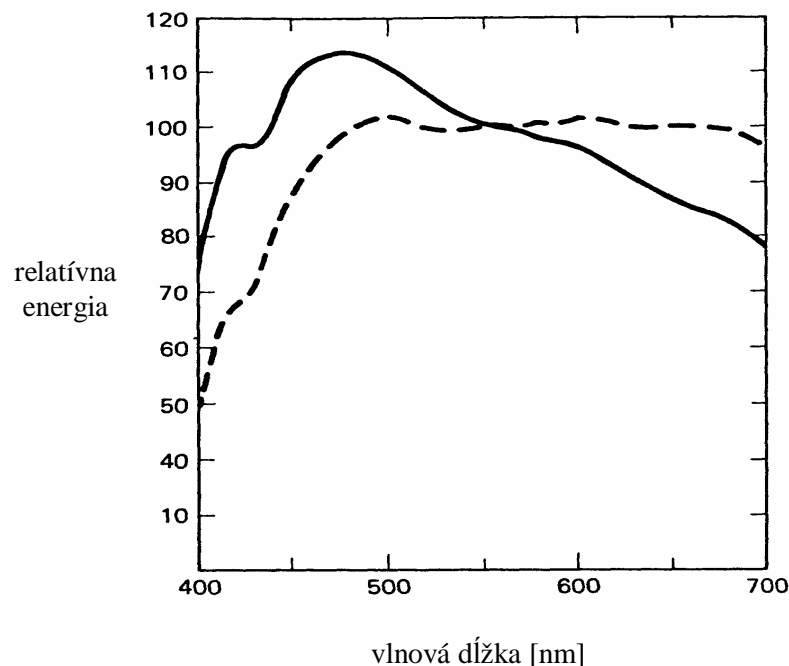
2.1.1 Svetlo ako elektromagnetické vlnenie

Zrakové vnímanie nám umožňuje svetlo. Existujú dva typy svetelných zdrojov: *primárne svetelné zdroje* vyžarujú vlastné svetlo, sú to napr. slnko, lampa, sviečka. *Sekundárne svetelné zdroje* iba odrážajú alebo pohlcujú svetlo vyžarované iným zdrojom, napr. mesiac, oblaky, stromy, atď. (Gonzalez, 1992, Lim, 1990, Ružický, 1995).

Svetlo je časť zo spojitého spektra elektromagnetického žiarenia. Elektromagnetická vlna nesie energiu. Množstvo energie, ktorú obsahuje vlna prechádzajúca cez rovinu sa dá vyjadriť pomocou funkcie $C(x, y, t, \lambda)$, kde x a y sú dve zo súradníc popisujúcich priestor, t je časová premenná a λ je vlnová dĺžka. Funkcia $C(x, y, t, \lambda)$ vyjadruje vyžarovanie pri danej vlnovej dĺžke. Vlnová dĺžka závisí od frekvencie podľa vzťahu

$$\lambda = c / f \quad (2.1)$$

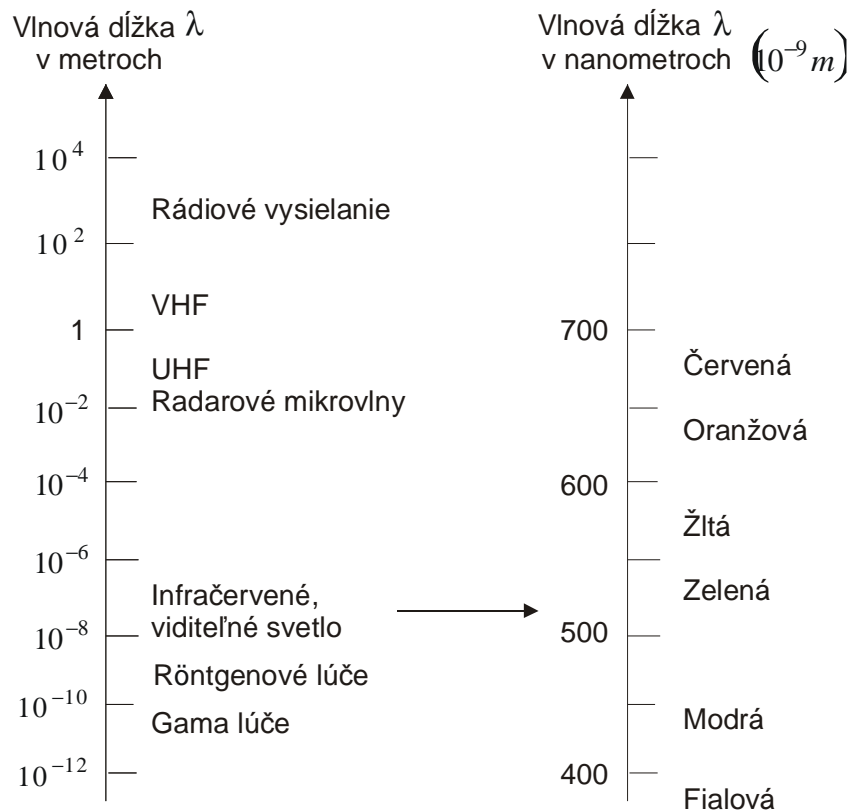
kde $c = 3 \times 10^8$ m/s. Funkcia $C(x, y, t, \lambda)$ môže byť vyjadrená pomocou frekvencie, ale pohodlnejšie je použiť vlnovú dĺžku λ .



Obr. 2.1 Spektrálny priebeh slnečného žiarenia nad zemskou atmosférou (plná čiara) a na zemskom povrchu na poludnie vo Washingtoni (čiarkovaná čiara) - (Lim, 1990).

Svetlo sa odlišuje od ostatných elektromagnetických vln - napr. rozhlasových alebo televíznych - tým, že oko je na svetlo citlivé. Ak si zafixujeme bod $[x, y]$ a čas t , možno skúmať $C(x, y, t, \lambda)$ iba ako funkciu λ (Lim, 1990). Príklad priebehu funkcie $C(\lambda)$ pre slnečné žiarenie je na

obr. 2.1. Ľudské oko je citlivé na elektromagnetické vlnenie iba v úzkom rozsahu vlnových dĺžok, a to približne od 350 nm po 750 nm. Na **obr. 2.2** sú znázornené rozdielne typy elektromagnetických vln ako funkcie vlnovej dĺžky. Elektromagnetické žiarenie s veľkou vlnovou dĺžkou, od pár centimetrov až po niekoľko metrov, generujú napr. elektrické obvody. Tento typ vyžarovania sa používa na rádiové prenosy a radar. Vlnenie s vlnovou dĺžkou λ o niečo väčšou ako 750 nm (hranica viditeľnej oblasti) sa nazýva infračervené, podobne ultrafialové je pre λ pod 350 nm. Obe, ultrafialové aj infračervené žiarenie, sú vyžarované typickými zdrojmi svetla, napríklad Slnkom. Žiarenie s vlnovou dĺžkou λ oveľa menšou, ako má viditeľná oblasť, sú napr. röntgenové lúče, gama žiarenie a kozmické lúče (konkrétne pre tie je λ menej ako 10^{-5} nm, resp. 10^{-14} m).



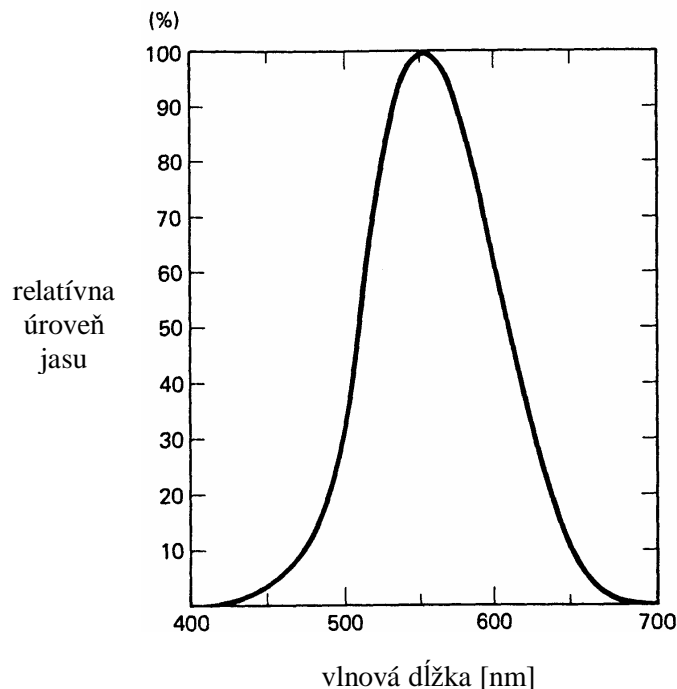
Obr. 2.2 Dva rozdielne typy elektromagnetických vln v závislosti od λ .

2.1.2 Jas, farebný tón a sýtosť

Naše vnímanie svetla podľa funkcie $C(\lambda)$ sa všeobecne spája s pojmami *jas* (brightness), *farebný tón* (hue) a *sýtosť* (saturation). Tieto tri veličiny závisia od množstva faktorov, ako je napr. presný tvar $C(\lambda)$, konkrétny priestor, v ktorom svetlo pozorujeme alebo špecifické vnímanie rôznych pozorovateľov (rozdielne reakcie na vizuálny podnet v závislosti od predchádzajúceho podnetu). Aj napriek tomu je možné vyjadriť súvislosti medzi týmito veličinami a špecifickými vlastnosťami funkcie $C(\lambda)$ (Lim, 1990, Gonzalez, 1992).

Základná fotometrická veličina je *luminancia* (jas), prijatá v roku 1948 organizáciou C.I.E. (Commission Internationale de l'Éclairage, Medzinárodná organizácia zaoberajúca sa štandardami pre svetlo a farby). Uvažujme svetlo s nulovou hodnotou funkcie $C(\lambda)$ všade okrem $\lambda = \lambda_r$, kde λ_r znamená pevnú referenčnú vlnovú dĺžku. Svetlo, ktoré sa skladá iba z jednej spektrálnej zložky (jednej vlnovej dĺžky) sa nazýva *monochromatické svetlo*. Pri pokusoch s pozorovateľmi, kedy sa porovnávali dva monochromatické zdroje, sa zistilo, že oko je maximálne citlivé na jas pri vlnovej dĺžke 555 nm

(zelenožlté svetlo). Na základe tohto zistenia bolo potom možné stanoviť relatívnu jasovú účinnosť ako funkciu vlnovej dĺžky λ (obr. 2.3) (Gonzalez, 1987).



Obr. 2.3 Funkcia relatívnej jasovej účinnosti podľa C.I.E.

Dva monochromatické zdroje svetla podľa funkcií $C_1(\lambda_1)$ a $C_2(\lambda_2)$ sa javia pozorovateľovi rovnako svetlé, keď

$$C_1(\lambda_1) \cdot v(\lambda_1) = C_2(\lambda_2) \cdot v(\lambda_2) \quad (2.2)$$

Funkcia $v(\lambda)$ závisí od pozorovateľa. Dokonca aj pre rovnakého pozorovateľa získame mierne odlišné hodnoty, ak sa meranie uskutočňuje v rôznych časoch (Ružický, 1995).

Základná jednotka luminancie (jasu) je lumen (lm). Luminancia svetla na plochu L pre $C(\lambda)$ je

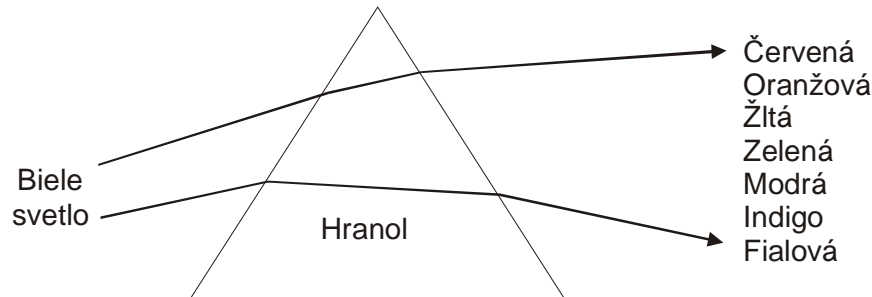
$$L = k \int_{\lambda=0}^{\infty} C(\lambda) \cdot v(\lambda) d\lambda \quad (2.3)$$

Jednotkou L je lm/m^2 , $k = 685 \text{ lm}/\text{W}$, $C(\lambda)$ je vo W/m^3 , $v(\lambda)$ je bezrozmerná veličina a λ je v metroch. Monochromatické svetlo s plošnou hustotou toku žiarenia $1 \text{ W}/\text{m}^2$ produkuje jas (luminanciu) $685 \text{ lm}/\text{m}^2$, keď $v(\lambda) = 1$. Toto platí pre vlnovú dĺžku $\lambda = 555 \text{ nm}$. Pri iných vlnových dĺžkach $v(\lambda) < 1$ a preto na vygenerovanie luminancie na plochu $685 \text{ lm}/\text{m}^2$ musí byť plošná hustota toku žiarenia väčšia ako $1 \text{ W}/\text{m}^2$. Je dôležité poznamenať, že luminancia, resp. luminancia na plochu, nezodpovedá ľudskému vnímaniu jasú. Napríklad, svetlo $2 \text{ lm}/\text{m}^2$ nevníma pozorovateľ ako dvakrát jasnejšie než svetlo $1 \text{ lm}/\text{m}^2$. Pri typických pozorovacích podmienkach (svetlo ani príliš slabé, ani silné) však prirodzene vnímame svetlo s väčšou luminanciou na plochu jasnejšie ako svetlo s menšou hodnotou luminancie na plochu.

Farbný tón je definovaný ako parameter, pomocou ktorého ľahšie rozlišujeme napr. červenú farbu od modrej. Svetlo s približne konštantnou hodnotou funkcie $C(\lambda)$ vo viditeľnej oblasti vyzerá ako biele alebo bezfarebné. Monochromatické svetlo sa pri normálnych pozorovacích podmienkach

javí farebné a farba závisí od λ . Svetlo môže byť rozložené na monochromatické zložky pomocou hranola (obr. 2.4), ako to dokázal už v roku 1666 Isaac Newton (Lim, 1990, Gonzalez, 1992).

Sýtosť sa zakladá na "čistote" farby. Monochromatické svetlo obsahuje veľmi čisté spektrálne zložky, preto sa aj hovorí, že je sýte. Akonáhle pribudnú ďalšie spektrálne zložky, farba je vnímaná ako menej sýta a čistá. Táto vlastnosť sa teda úzko spája s efektívnou šírkou funkcie $C(\lambda)$.



Obr. 2.4 Rozklad "bieleho" svetla na jednotlivé monochromatické zložky pomocou hranola.

2.1.3 Aditívne a subtraktívne farebné sústavy

Kombináciou dvoch zdrojov svetla podľa funkcií $C_1(\lambda)$ a $C_2(\lambda)$ vzniká svetlo:

$$C(\lambda) = C_1(\lambda) + C_2(\lambda) \quad (2.4)$$

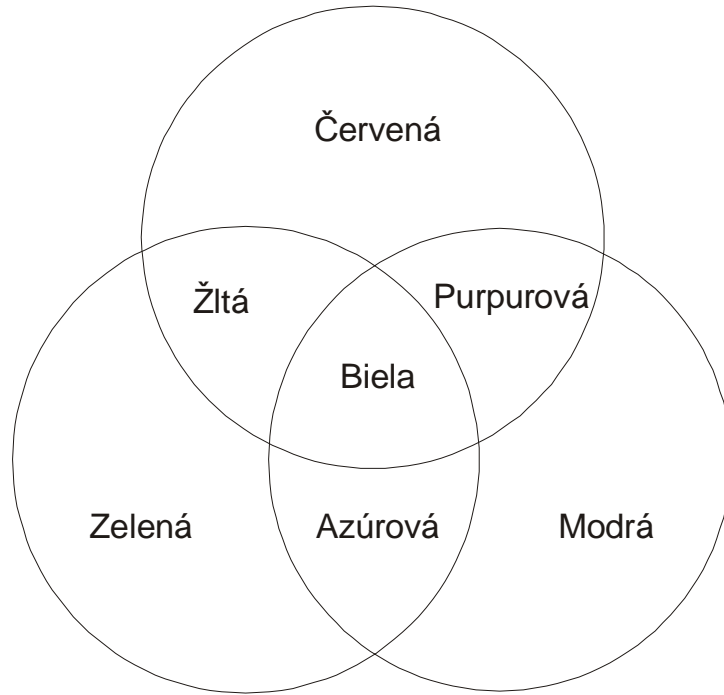
Zložky sa sčítavajú, preto takýto systém nazývame *aditívny farebný systém*. Sčítaním zdrojov svetla s rozdielnymi vlnovými dĺžkami možno vyprodukovať veľké množstvo rôznych farieb. Napríklad obrazovka farebného televízneho prijímača obsahuje skupiny malých fosforových bodov zoskupených do trojíc. Každá táto skupina sa skladá z jedného červeného, jedného zeleného a jedného modrého bodu. Používajú sa práve tieto tri farby, pretože ich správnou kombináciou sme schopní vyprodukovať širšie spektrum farieb než pri použití ľubovoľnej inej trojice farieb. Nazývame ich *primárne farby aditívneho farebného systému*. Farby monochromatického svetla sa s vlnovou dĺžkou menia plynule, takže je ťažké určiť presne, čo je napr. červená, zelená a pod. Preto C.I.E. stanovila štandardné vlnové dĺžky primárnych farieb aditívneho systému nasledovne (Gonzalez, 1987, Lim, 1990):

- červená (R) $\lambda = 700$ nm,
- zelená (G) $\lambda = 546,1$ nm,
- modrá (B) $\lambda = 435,8$ nm.

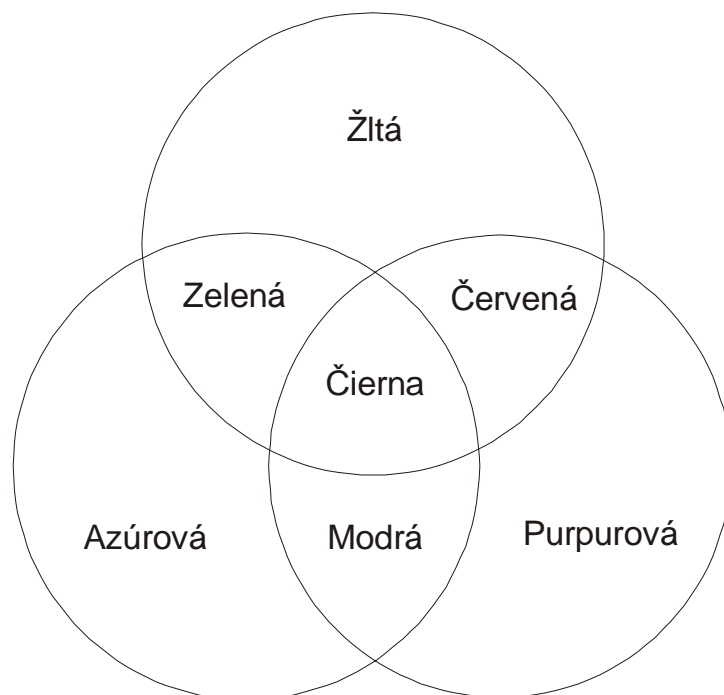
Sčítaním primárnych farieb získame *sekundárne farby*; napríklad rovnaké množstvo červenej a zelenej produkuje žltú farbu, podobne získame azúrovú (modrozelenú) a purpurovú (fialovú) farbu. Kombináciou rovnakého množstva R, G a B získame bielu farbu.

V prírode často funguje opačný systém: ofiltrovanie (odčítanie) jedných a odraz iných vlnových dĺžok. Tento proces je zapríčinený molekulami nazývanými pigment, ktoré dokážu absorbovať isté časti spektra. Keď napríklad slnečné svetlo, ktoré sa skladá z mnohých vlnových dĺžok, dopadne na červené jablko, milióny molekúl pigmentu na povrchu jablka absorbujú všetky vlnové dĺžky okrem tých, ktoré zodpovedajú červenej farbe. Takýto systém sa nazýva *subtraktívny farebný systém*. Subtraktívnym spôsobom pracuje napríklad aj farebná tlačiareň - kombinácia rôznych farieb náplní v spojení s papierom (Ružický, 1995, Gonzalez, 1992).

Tri *primárne farby subtraktívneho farebného systému* sú žltá (yellow, Y), azúrová (cyan, C) a purpurová (magenta, M). Opäť rôznymi kombináciami môžeme vytvoriť veľké množstvo farieb. Kombináciou rovnakého množstva všetkých troch farieb Y, C a M získame čiernu farbu; pretože pigmenty absorbovali všetky vlnové dĺžky z viditeľnej časti spektra.



Obr. 2.5 Primárne a sekundárne farby aditívneho farebného systému.



Obr. 2.6 Primárne a sekundárne farby subtraktívneho farebného systému.

2.1.4 Reprezentácia monochromatických a farebných obrazov

Pre čiernobiely obraz môže byť svetlo podľa funkcie $C(\lambda)$ reprezentované jedným číslom I nasledovne:

$$I = k \int_{\lambda=0}^{\infty} C(\lambda) \cdot s_{BW}(\lambda) d\lambda \quad (2.5)$$

kde $s_{BW}(\lambda)$ je spektrálna charakteristika použitého senzora a k je normovacia konštanta. Hodnota I sa nazýva luminancia, intenzita, jas alebo úroveň šedej (Lim, 1990). Keďže vzťah (2.5) reprezentuje výkon na jednotku plochy, je vždy nezáporný a konečný:

$$0 \leq I \leq I_{MAX} \quad (2.6)$$

Farebný obraz môžeme chápať ako tri monochromatické obrazy (Gonzalez, 1992, Ružický, 1995). Pre farebný obraz je svetlo s charakteristikou $C(\lambda)$ reprezentované tzv. trichromatickými zložkami. Jedna množina, ktorá sa v praxi často používa, je R , G , B . Reprezentuje intenzitu červenej, zelenej a modrej zložky. Hodnoty trichromatických zložiek R , G a B získame nasledovne:

$$R = k \int_{\lambda=0}^{\infty} C(\lambda) \cdot s_R(\lambda) d\lambda \quad (2.7a)$$

$$G = k \int_{\lambda=0}^{\infty} C(\lambda) \cdot s_G(\lambda) d\lambda \quad (2.7b)$$

$$B = k \int_{\lambda=0}^{\infty} C(\lambda) \cdot s_B(\lambda) d\lambda \quad (2.7c)$$

kde $s_R(\lambda)$, $s_G(\lambda)$ a $s_B(\lambda)$ sú spektrálne charakteristiky červeného, zeleného a modrého senzora (filtra). Všetky tri úrovne R , G , B sú nezáporné a konečné. Jedna z použiteľných množín charakteristík $s_R(\lambda)$, $s_G(\lambda)$ a $s_B(\lambda)$ je na obr. 2.7. Aplikáciou týchto filtrov na farebný obraz (obr. 2.8a) dostaneme tri obrazy zodpovedajúce príslušnej farebnej sústave (obr. 2.8b,c,d). Každý obraz zahŕňa jas, farebný tón a sýtosť zodpovedajúcej farby v pôvodnom farebnom obraze.

Transformácia trichromatických zložiek R , G , B na luminančno-chromatickú množinu zložiek (YIQ) používaných napr. v TV monitore zodpovedá riešeniu sústavy rovníc (NTSC farebný systém):

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ 0,596 & -0,274 & -0,322 \\ 0,211 & -0,523 & 0,312 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2.8a)$$

kde Y je luminančná zložka, I a Q sú chromatické zložky (Lim, 1990, Gonzalez, 1987). Všeobecne platí, že najviac informácie o obraze je "ukrytej" v jasovej zložke. Kameranou sítou nasnímame zložky R , G , B , no pre ďalšie spracovanie je výhodné pracovať iba s jednou zložkou, pretože R , G a B sú vysoko korelované. A to nielen kvôli úspornosti spracovania farebného signálu, ale aj preto, aby bolo možné preniesť a zobrazit' čiernobiely aj farebný signál na jednom prijímači. Príklad rozloženia obrazu na zložky Y , I a Q je na obr. 2.9a,b,c.

Pre prenos televízneho signálu boli definované normy, ktoré sa odlišujú v rôznych krajinách: NTSC norma sa používa v USA a v Japonsku, normy PAL a SECAM sa používajú v Európe (Dub Expres Video, 2001). Norma PAL transformuje RGB na YUV, pričom Y je luminančná a U , V sú chromatické zložky. Predpis prepočtu je nasledovný:

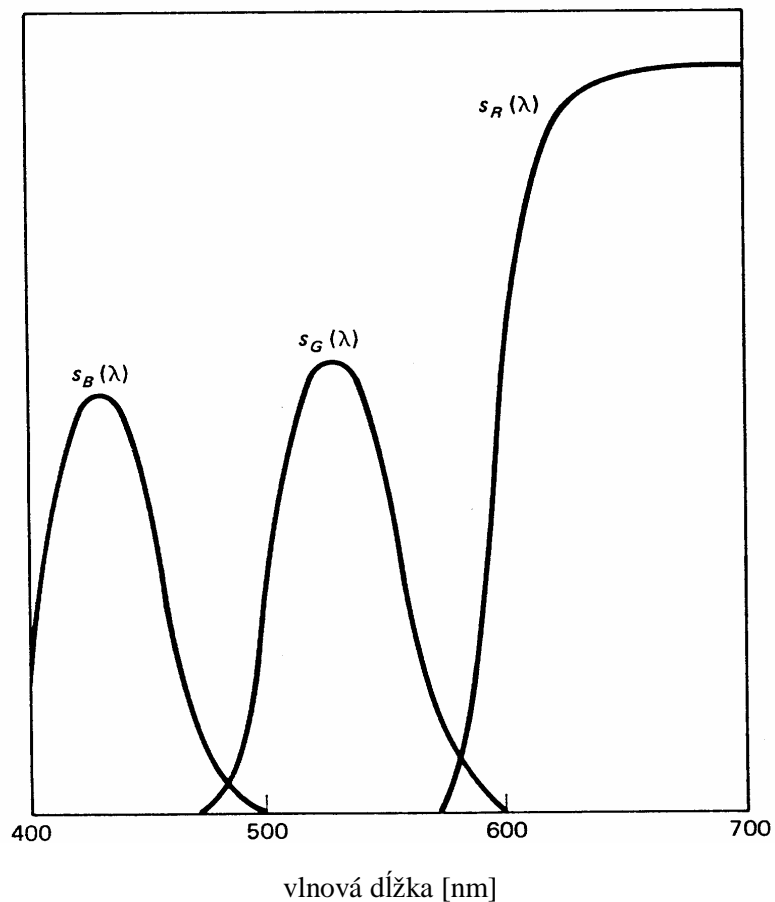
$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ 0,147 & -0,289 & -0,436 \\ 0,615 & -0,515 & -0,100 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2.8b)$$

Pre prenos Y zložky sa používa šírka pásma 5 MHz, každá chromatická zložka zaberá 1,5 MHz. U a V zložky sa dajú vypočítať pomocou Y a R , B takto:

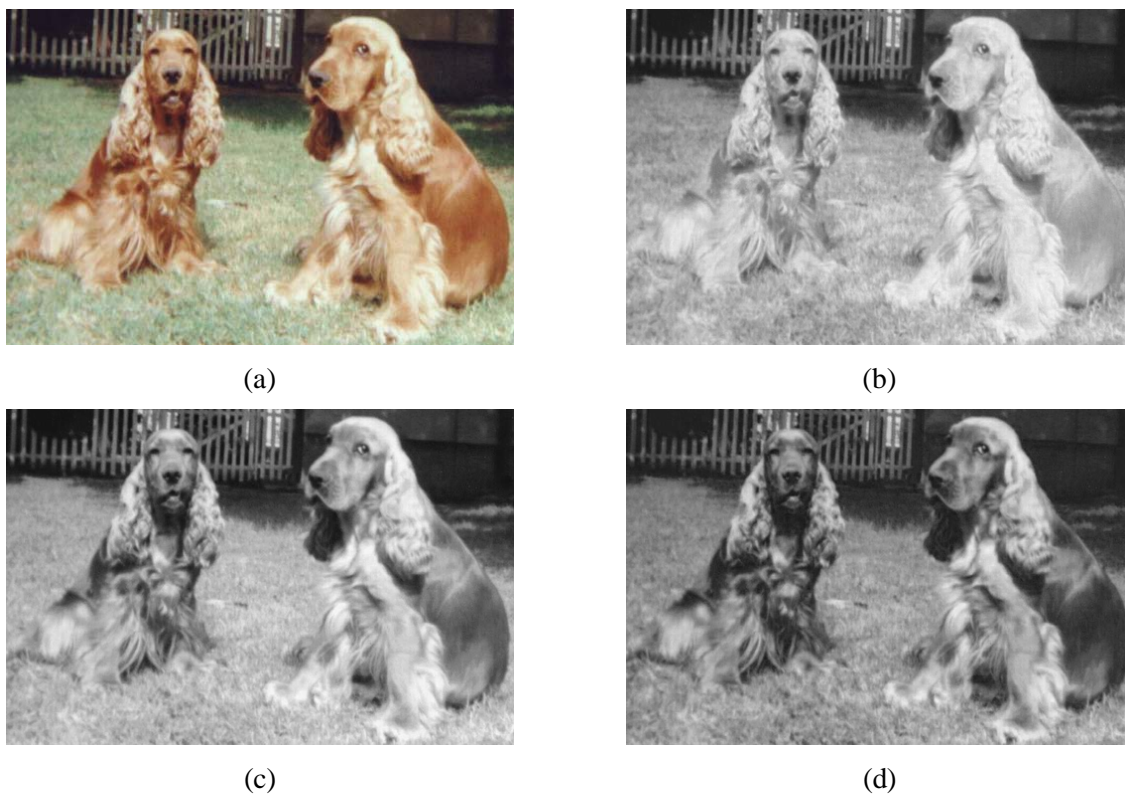
$$U = 0,492(B - Y) \quad (2.8c)$$

$$V = 0,877(R - Y) \quad (2.8d)$$

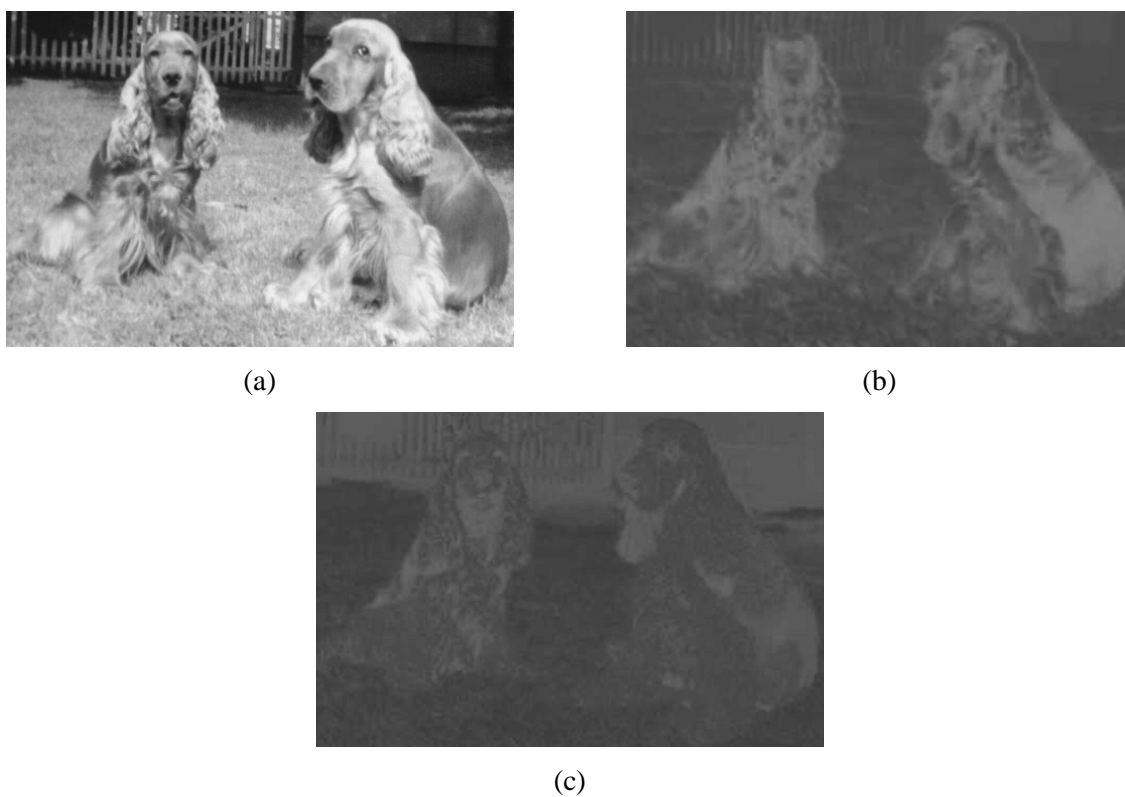
Pri čiernobielym obraze sa jednoducho zrušia zložky U a V . V systéme PAL sa vzorkuje frekvenciou 10-11 MHz, ale jestvuje aj odporúčanie CCIR 601 (Ghanbari, 1999), ktoré hovorí o hodnote 13,5 MHz pre luminančnú zložku a 6,75 MHz pre chromatické zložky.



Obr. 2.7 Príklad spektrálnych charakteristík R , G a B senzorov (Lim, 1990).



Obr. 2.8 Originál farebného obrazu (a) a jeho rozklad na R , G , B zložky (b-d).



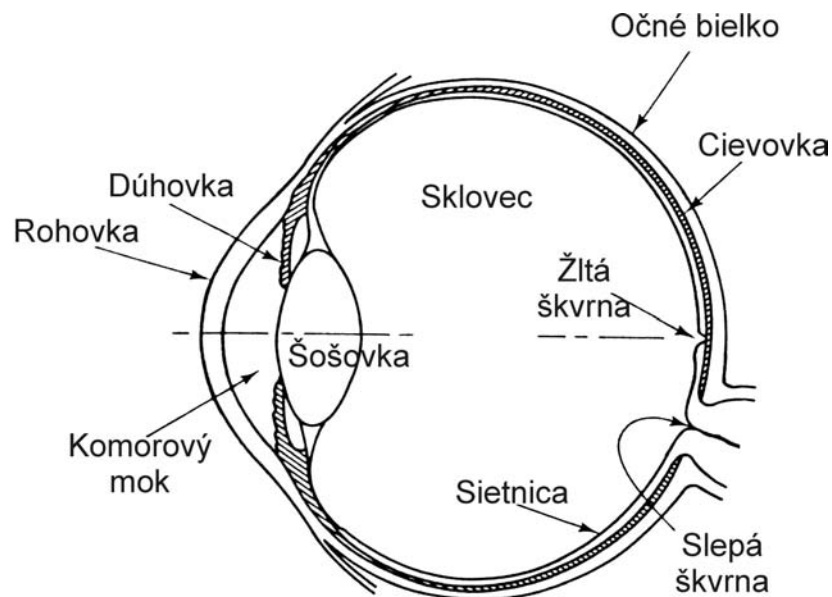
Obr. 2.9 Rozklad farebného obrazu z obr. 2.8a na Y , I , Q zložky (a-c). Zložky I a Q majú dodatočne zvýšený kontrast kvôli lepšej názornosti.

2.2 ĽUDSKÝ VIZUÁLNY SYSTÉM

2.2.1 Oko

Náš vizuálny systém nám umožňuje usporiadať a pochopiť množstvo zložitých predmetov v našom okolí. Vizuálny systém pozostáva z oka, ktoré transformuje svetlo na nervové signály a z časti mozgu, ktorá tieto nervové signály spracováva a vyberá z nich dôležité informácie (Lim, 1990, Ružický, 1995).

Oko, začiatok vizuálneho systému, má tvar gule s priemerom asi 2 cm. Z funkčného hľadiska je oko orgán, ktorý zhromažďuje svetlo a premieta ho na povrch vo svojej zadnej časti. Prierez oka je na obr. 2.10. Vpredu oko pokrýva rohovka – hrubá priehľadná membrána. Hlavnou funkciou rohovky je lámať (ohýbať) svetlo.



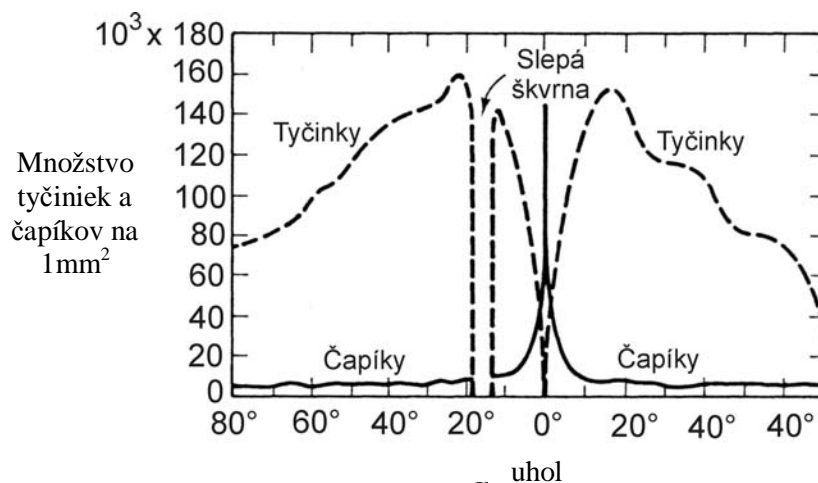
Obr. 2.10 Horizontálny prierez ľudskeho oka, pohľad zvrchu.

Za rohovkou je komorový mok – čistá priehľadná tekutina. Za rohovkou a komorovým mokom je dúhovka. Funkciou dúhovky je regulácia množstva svetla vstupujúceho do oka. Túto funkciu zabezpečuje zmenou veľkosti malého otvoru v strede dúhovky – zreničky, ktorej priemer sa mení v rozmedzí od 1,5 mm do 8 mm. Čím je intenzita svetla vstupujúceho do oka vyššia, resp. nižšia, tým je priemer zreničky menší, resp. väčší. Za dúhovkou je šošovka, ktorá má bikonvexný tvar. Jej index odrazu 1,4 je vyšší než index odrazu ktorejkoľvek inej časti oka, cez ktorú prechádza svetlo. Šošovka sa počas života zväčšuje. Hlavnou funkciou šošovky je nasmerovať prichádzajúce svetlo na zadnú časť oka nazývanú sietnica. Priemer šošovky sa mení v závislosti od toho, či pozorujeme vzdialené objekty alebo objekty v našej blízkosti. Tento proces sa nazýva *akomodácia* (Gonzalez, 1987). Za šošovkou sa nachádza sklovec, ktorý vyplní vnútro oka. Jeho úlohou je udržiavať guľovitý tvar oka.

Za sklovcom je sietnica, ktorá pokrýva 65% vnútorného povrchu očnej gule. Na bunky sietnice dopadá svetlo a tie ho premieňajú na nervové signály. V sietnici sa nachádzajú dva druhy buniek citlivých na svetlo. Nazývajú sa *čapíky* a *tyčinky*. Čapíky, ktorých je asi 7 miliónov, sú menej citlivé na svetlo než tyčinky a sú určené hlavne pre denné (fotopické) videnie. Vďaka nim dokážeme rozoznávať farby. Tyčinky, ktorých je asi 120 miliónov, sú na svetlo citlivejšie ako čapíky a sú určené hlavne pre nočné (skotopické) videnie (Ružický, 1995, Lim, 1990, Gonzalez 1987).

Rozloženie tyčiniek a čapíkov na sietnici nie je rovnomerné. Ich rozloženie je znázornené na obr. 2.11. V strede sietnice, priamo za zreničkou, sa nachádza miesto s najväčšou koncentráciou

čapíkov - žltá škvrna. Toto miesto je preto najvhodnejšie pre videnie v ostrom svetle. Na tomto mieste sa nenachádzajú žiadne tyčinky, a preto objekty v šere priamo pred sebou nevidíme, a musíme na ne hľadiť trochu šikmo.



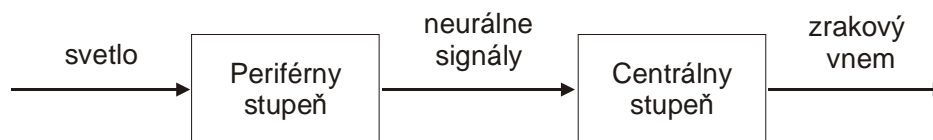
Obr. 2.11 Rozloženie tyčínok (prerušovaná čiara) a čapíkov (plná čiara) - (Lim, 1990).

Keď svetlo dopadne na tyčinky alebo čapíky, nastane elektrochemická reakcia, ktorá transformuje svetlo na nervové vzruchy. Tie sa cez vlákna optického nervu šíria smerom do mozgu. Počet nervových vlákien je asi 1 milión a musia obslúžiť okolo 130 miliónov svetlocitlivých buniek (tyčínok a čapíkov). To znamená, že jedno nervové vlákno obsluhuje v priemere 100 buniek v sietnici. Pritom niektoré čapíky v žltej škvrne sú obsluhované jediným nervovým vláknom, čo zvyšuje ostrosť videnia v tomto mieste.

Na mieste, kde očný nerv opúšťa oko, sa nachádza slepá škvrna. Tu sa nenachádzajú tyčinky ani čapíky, a preto svetlo, ktoré dopadá na toto miesto, nevidíme.

2.2.2 Model periférnej časti vizuálneho systému

Ludský vizuálny systém opísaný v kapitole 2.2.1 je možné znázorniť kaskádou dvoch systémov (obr. 2.12). Prvý systém, ktorý reprezentuje periférnu časť vizuálneho systému, konvertuje svetlo na neurálny signál. Druhý systém, ktorý reprezentuje centrálnu časť vizuálneho systému, spracúva neurálny signál, snaží sa o získanie informácie (Lim, 1990).



Obr. 2.12 Ludský vizuálny systém ako kaskáda dvoch systémov.

Na rozdiel od spôsobu fungovania centrálnej časti, činnosť periférnej časti spracovania je všeobecne známa, pričom bolo vykonaných viacero pokusov s cieľom modelovať ju. Jeden jednoduchý model pre monochromatický obraz, ktorý je konzistentný s niektorými známymi vizuálnymi javmi, je zobrazený na obr. 2.13. V tomto modeli intenzitu monochromatického obrazu $I(x, y)$ nelineárne modifikujeme logaritmickou operáciou, ktorá stláča rozsah intenzít vyššej úrovne a zväčšuje rozsah intenzít nižšej úrovne. Výsledok následne filtrujeme lineárnym systémom

invariantným proti posunu (LSI) s frekvenčnou charakteristikou $H(\Omega_x, \Omega_y)$. Použitie nelinearity je motivované niektorými psychofyzikálnymi experimentmi, o ktorých sa píše v kapitole 2.3. LSI systém s charakterom pásmového priepustu je použitý z dôvodu konečnej veľkosti zrenice, rozlišovacej schopnosti vplyvom konečného počtu svetlocitlivých buniek a procesu laterálnej inhibície. Konečná veľkosť zrenice a konečný počet svetlocitlivých buniek zodpovedajú dolnopriepustnej časti filtra. Naopak proces laterálnej inhibície zdôvodňuje zavedenie hornopriepustného charakteru filtra. Výsledkom je filter charakteru pásmového priepustu. Hoci je model veľmi jednoduchý a aplikovaný len na periférnu časť vizuálneho systému, je konzistentný s niektorými zrakovými javmi uvedenými v ďalších kapitolách.



Obr. 2.13 Jednoduchý model periférnej časti ľudského vizuálneho systému.

Spôsob, ako zúžitkovať takýto jednoduchý model, je spracovávať obraz v oblasti, ktorá priamo súvisí s priestorom zrakového vnímania. V niektorých aplikáciách to môže byť veľmi výhodné. Napríklad pri kódovaní obrazu nie je potrebné zakódovať informáciu, ktorá sa síce v obraze nachádza, no zrakovým systémom je potlačená. Potom môžeme kľásť väčší dôraz na informácie, ktoré sú dôležité aj pre ľudský vizuálny systém. Toto je tiež jeden z dôvodov, prečo sa niektoré operácie spracovania obrazu vykonávajú až po zlogaritmovaní intenzity jasu obrazu (Lim, 1990).

2.3 SPÔSOB VNÍMANIA ĽUDSKÉHO VIZUÁLNEHO SYSTÉMU

2.3.1 Citlivosť na intenzitu

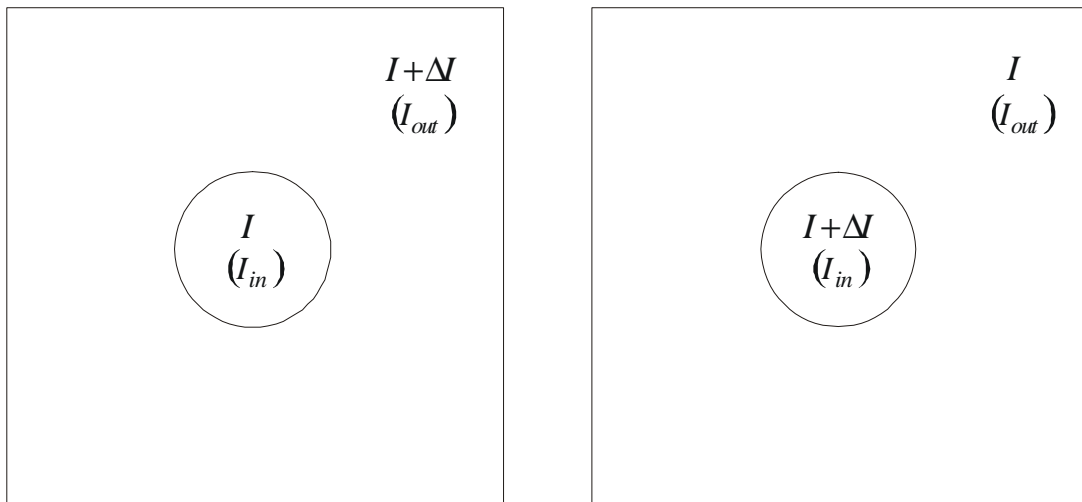
Jedným z možných postupov, ako určiť našu schopnosť rozlíšiť dva vizuálne podnety, ktoré sa odlišujú len v intenzite, je meranie minimálneho badateľného prírastku (diferencie) intenzity. Minimálny badateľný prírastok môžeme zdefinovať a merať rôznymi spôsobmi. Jedným z nich je experiment nazvaný *rozlíšenie intenzity* (intensity discrimination). Predpokladajme, že pozorovateľovi ukážeme pomôcku (vizuálny podnet) podľa obr. 2.14. Vnútorňa oblasť (kruh) je monochromatický obraz s intenzitou I_{in} , ktorá sa náhodne volí medzi hodnotami I a $I + \Delta I$. Vonkajšia oblasť je monochromatický obraz s intenzitou I_{out} , ktorá sa volí tiež medzi hodnotami I a $I + \Delta I$, no presne opačne ako v prípade vnútornej oblasti. Pozorovateľ musí rozhodnúť, ktorá z intenzít I_{in} a I_{out} je jasnejšia. Pokiaľ je prírastok ΔI veľký, pozorovateľ takmer vždy poskytne správnu odpoveď. V opačnom prípade (malý prírastok) odpovie pozorovateľ správne približne v polovici pokusov. Minimálny badateľný prírastok intenzity potom môžeme zdefinovať ako taký prírastok ΔI , pri ktorom pozorovateľ odpovie správne na 75 percent (Gonzalez, 1992, Lim, 1990).

Výsledok po zakreslení pomeru $\Delta I / I$ ako funkcie intenzity I , kde ΔI je minimálny badateľný prírastok, je znázornený na obr. 2.15. Z obrázka je zjavné, že pre veľký rozsah intenzít platí

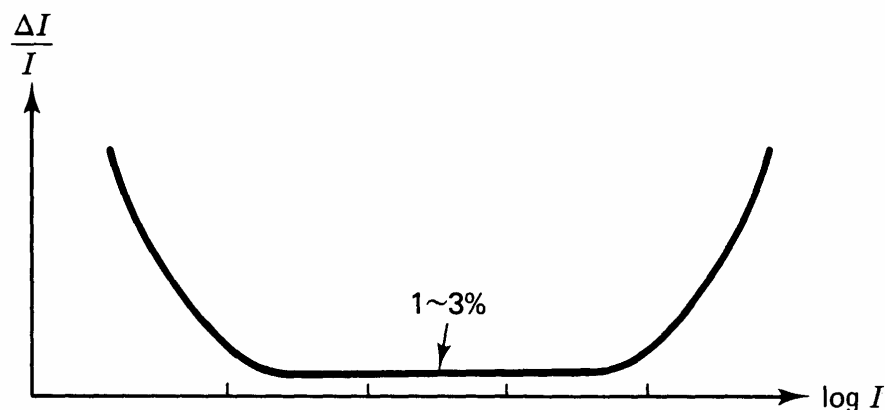
$$\frac{\Delta I}{I} \approx \text{konšt}, \quad (2.9)$$

pričom túto vlastnosť nazývame Weberov kontrast (zákon). Weberov zákon vyjadruje proporcionálny vzťah medzi minimálnym badateľným prírastkom v intenzite jasu a samotnou intenzitou jasu obrazu. Pokiaľ zvýšime intenzitu jasu I , potrebujeme väčší prírastok ΔI , aby súčet intenzít $I + \Delta I$ bol rozoznateľný od pôvodnej intenzity I . Weberov zákon je v širšom meradle aplikovateľný aj pri ostatných zmysloch (sluch, čuch, chuť a hmat). Ak sa minimálny prírastok ΔI blíži k nule, Weberov zákon môžeme prepísať do diferenciálneho tvaru

$$\frac{dI}{I} = d(\log I) \approx \text{konšt.} \quad (2.10)$$



Obr. 2.14 Dve pomôcky použité pri experimente rozlíšenia intenzity. Každý pokus je založený na ukázaní jednej z dvoch pomôcok osobe, ktorá má rozhodnúť, ktorá z dvoch intenzít I_{in} a I_{out} sa javí ako jasnejšia. Pomôcka k pokusu sa zvolí náhodne z dvoch dostupných. Výsledok experimentu môže slúžiť na získanie závislosti badateľného prírastku intenzity ΔI od hodnoty intenzity I .

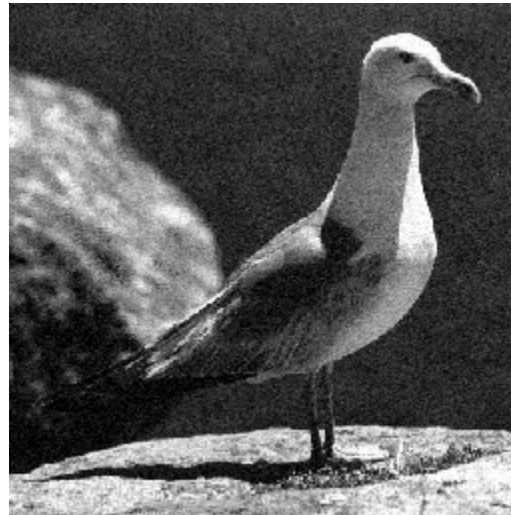


Obr. 2.15 Graf závislosti $\Delta I/I$ od hodnoty intenzity jasu I . Prírastok ΔI reprezentuje minimálnu badateľnú zmenu v intenzite jasu. V širokom pásme intenzity jasu je aproximácia konštantná. Tento vzťah je známy ako Weberov zákon.

Zo vzťahu (2.10) je zrejmé, že minimálny badateľný prírastok v logaritmickej mierke intenzity je konštantný pre široké pásme intenzít. Táto vlastnosť korešponduje s potrebou vyjadriť v modeli

periférnej časti ľudského vizuálneho systému (obr. 2.13) nelinearitu, akou je napríklad logaritmus. Pri experimente dostane pozorovateľ jednoduchú úlohu, pričom komplikovaná centrálna časť spracovania vnemu nie je potrebná. Výsledok experimentu sa preto vzťahuje len na periférnu časť spracovania v ľudskom vizuálnom systéme.

Experiment potvrdzuje, že minimálny prírastok ΔI rastie s rastom intenzity I . Toto čiastočne vysvetľuje, prečo rovnomerná úroveň šumu je viac viditeľná v tmavších oblastiach obrazu ako vo svetlejších. Na obr. 2.16 je zobrazený výsledok pridania bieleho šumu s nulovou strednou hodnotou a s rovnomernou hustotou pravdepodobnosti ku originálnemu nedegradovanému obrazu. Zrnitý vzhľad výsledného obrazu je viditeľnejší v tmavých oblastiach. Výsledkom tohto pozorovania pre spracovanie obrazu je fakt, že odstraňovanie šumu v tmavších oblastiach obrazu je dôležitejšie ako odstraňovanie šumu vo svetlejších oblastiach (Gonzalez, 1992, Lim, 1990).

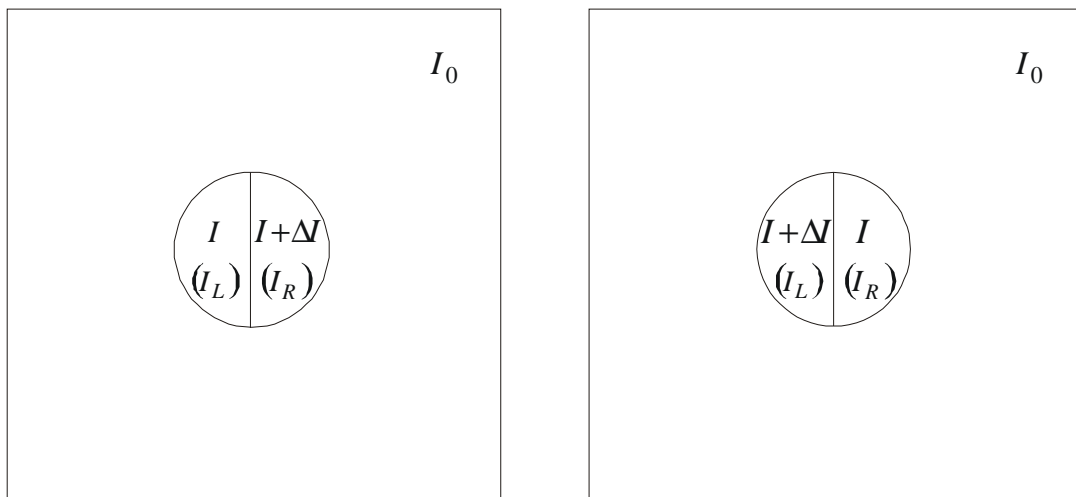


Obr. 2.16 *Obraz degradovaný bielym šumom s rovnomerným rozdelením hustoty pravdepodobnosti. Rovnaká úroveň šumu je viditeľnejšia v tmavšej oblasti obrazu, menej viditeľná je vo svetlejšej oblasti. Rovnaká úroveň šumu je viditeľnejšia na pozadí s rovnomernou intenzitou a menej viditeľná v oblastiach obsahujúcich hrany.*

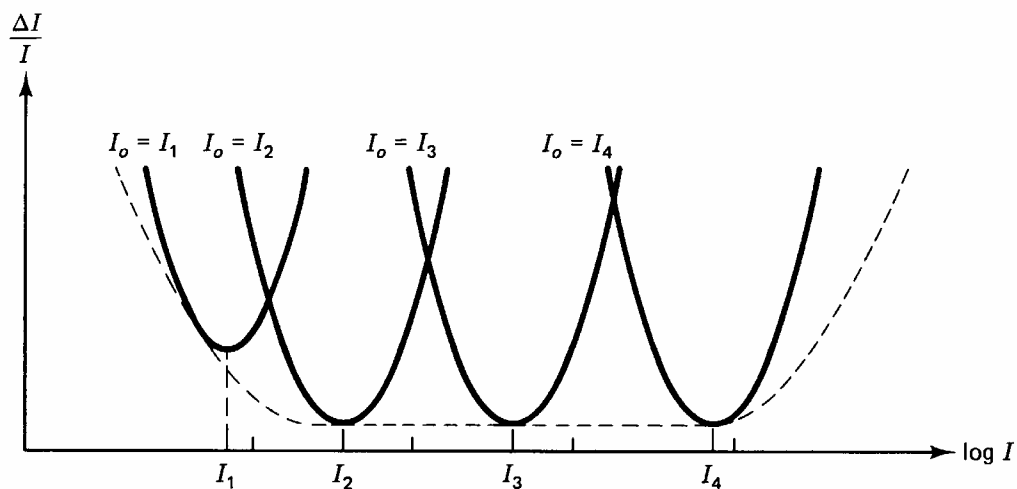
2.3.2 Adaptácia

V predchádzajúcej kapitole sme pri experimente rozlíšenia intenzity používali hodnoty intenzít I a $I + \Delta I$. Pokiaľ pozorovateľovi necháme viac času na premýšľanie pred rozhodnutím o jasnejšej intenzite, získame výsledok ovplyvnený adaptáciou na intenzitu I . Ak sa však pozorovateľ adaptuje na intenzitu inej hodnoty ako I , jeho rozlišovacie schopnosti poklesnú. Predpokladajme rovnaký experiment ako v kapitole 2.3.1 s tým rozdielom, že vnútornú kruhovú oblasť, ktorá je teraz rozdelená na dve časti, bude obklopovať veľká vonkajšia oblasť s intenzitou I_0 (obr. 2.17).

Výsledná charakteristika pomeru $\Delta I / I$ ako funkcia intenzít I a I_0 je zobrazená na obr. 2.18. Pri rovnosti intenzít I a I_0 je výsledok rovnaký ako na obr. 2.15. Pokiaľ sú tieto dve hodnoty rozdielne, minimálny badateľný prírastok ΔI je väčší ako v prípade rovnosti, čo poukazuje na zníženie pozorovateľovej citlivosti na intenzitu jasu. Je zrejmé, že citlivosť na rozdiel v intenzite jasu je najvyššia v blízkosti úrovne intenzity, na ktorú je pozorovateľ adaptovaný. Preto ľudský vizuálny systém v rozličných okamihoch reaguje na široké spektrum intenzít rozdielnym spôsobom (Lim, 1990).



Obr. 2.17 Dve pomôcky použité na skúmanie efektu adaptácie oka. Každý pokus je založený na ukázaní jednej z dvoch pomôcok osobe, ktorá má rozhodnúť, ktorá z dvoch intenzít I_L a I_R sa zdá jasnejšia. Pomôcka k pokusu sa zvolí náhodne z dvoch dostupných. Výsledok experimentu môže slúžiť na získanie závislosti minimálneho badateľného prírastku intenzity jas ΔI od hodnôt intenzít I a I_0 .



Obr. 2.18 Graf závislosti $\Delta I/I$ od hodnôt intenzít I a I_0 . Ak sa intenzity I a I_0 rovnajú, pomer je rovnaký ako na obr. 2.15 (bodkovaná čiara). Ak sa intenzity nerovnajú, pomer $\Delta I/I$ vzrastá voči prípadu rovnosti $I = I_0$. To znamená, že pozorovateľova citlivosť na intenzitu klesá.

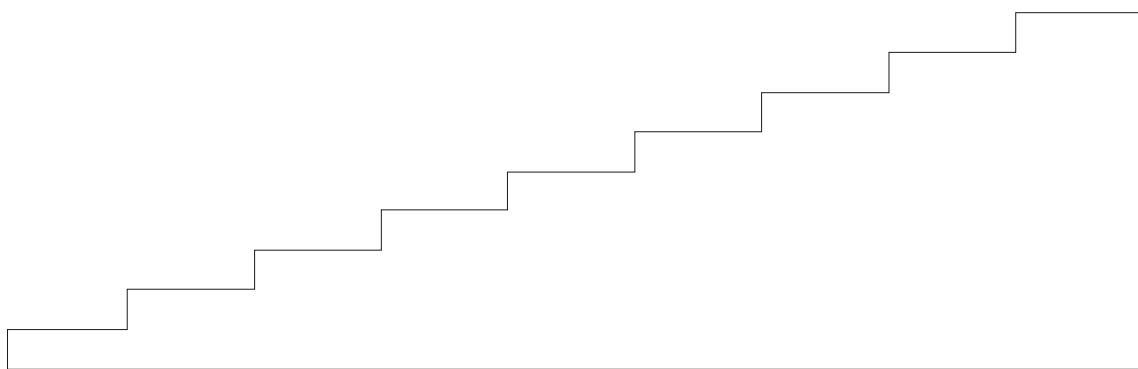
2.3.3 Machov pásmový efekt

Uvažujme o obraze, ktorého celková intenzita je konštantná pozdĺž zvislej osi, ale vzrastá schodovitým spôsobom pozdĺž horizontálnej osi (obr. 2.19a). Rast intenzity je načrtnutý na obr. 2.19b. Napriek tomu, že intenzita vo vnútri každého pravouhlého regiónu je konštantná, každý región vyzerá vľavo svetlejší než vpravo. Tento jav nazývame Machov pásmový efekt (Gonzalez, 1992, Lim, 1990). Fenomén súvisí s prítomnosťou priestorovej filtrácie v periférnej časti vizuálneho systému (obr. 2.13).

Keď prechádza cez filter signál s ostrými nespojitosťami, objavia sa podkmity a prekmity. Toto je čiastočne spôsobené nerovnomerným vnímaním jasů vo vnútri regiónu rovnakej intenzity.

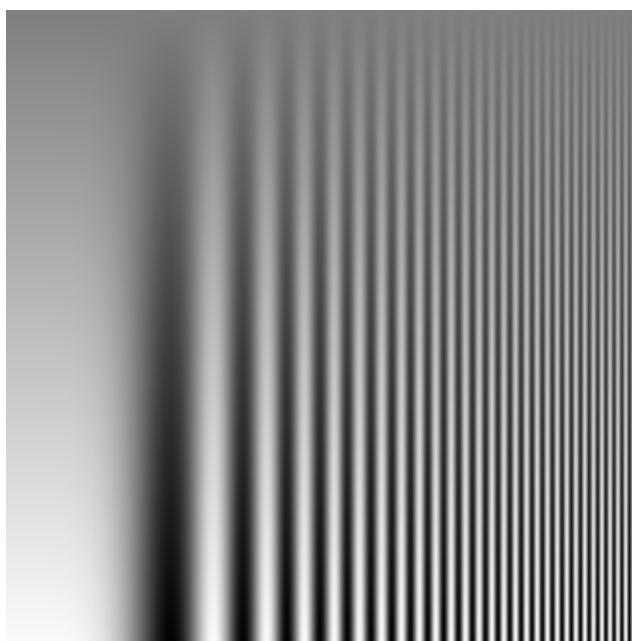


(a)



(b)

Obr. 2.19 Ilustrácia Machovho pásmového efektu.



Obr. 2.20 Modulovaný sínusový priebeh ilustrujúci pásmovo-priepustný charakter periférnej časti ľudského vizuálneho systému (Lim, 1990).

Prítomnosť priestorového filtra typu pásmovej priepuste vo vizuálnom systéme môžeme vidieť na obr. 2.20. Obraz $I(x, y)$ je definovaný:

$$I(x, y) = I_0(y) \cdot \cos(\omega(x) \cdot x) + k \quad (2.11)$$

kde konštanta k je volená tak, aby $I(x, y)$ bolo v každom bode obrazu kladné. Priestorová frekvencia $\omega(x)$ rastie na horizontálnej osi zľava doprava a amplitúda $I_0(y)$ na vertikálnej osi zhora nadol stúpa. Ak by bola priestorová frekvenčná odozva konštantná v celom frekvenčnom rozsahu, citlivosť na intenzitu by mala byť konštantná pozdĺž horizontálnej osi. No podľa obr. 2.20 sme citlivejší na kontrast v regiónoch so strednou frekvenciou ako v regiónoch s vysokými alebo nízkymi frekvenciami, čo súvisí s filtrom typu pásmovej priepuste v našom vizuálnom systéme (Lim, 1990).

2.3.4 Priestorové maskovanie

Ak pridáme náhodný šum rovnakej úrovne do obrázku, je oveľa zreteľnejší na homogénnom pozadí ako v oblastiach s veľkými zmenami kontrastu. Podľa obr. 2.16 z kapitoly 2.3.1 je šum menej viditeľný v oblastiach s hranami ako na homogénnych oblastiach. Dokonca aj šum v tmavých oblastiach, ktoré obsahujú hrany, je menej viditeľný ako šum vo svetlých oblastiach s rovnomerným rozložením intenzity.

Túto skutočnosť vystihuje lokálna charakteristika odstupu signálu od šumu (SNR). Ak uvažujeme lokálny SNR ako pomer rozptylu signálu ku rozptylu šumu v danej oblasti pri rovnakej úrovni šumu, je pomer SNR menší v oblastiach s rovnomerným rozložením jasů (čomu zodpovedá malý rozptyl) ako v regiónoch s vysokým kontrastom (veľký rozptyl) (Lim, 1990). Iný, no súvisiaci pohľad na vec, poskytuje priestorové maskovanie. Vo vysoko kontrastných oblastiach je úroveň signálu vysoká, čo vedie k lepšiemu zamaskovaniu šumu.

Efekt priestorového maskovania môže byť využitý pri spracovaní obrazu. Napríklad snaha o odstránenie šumu priestorovou filtráciou má zvyčajne za následok určité rozmazanie obrazu. Vo vysoko kontrastných oblastiach, kde by bol efekt rozmazania priestorovou filtráciou zreteľnejší, nie je šum až taký viditeľný. Stačí teda menej dôrazná priestorová filtrácia šumu.

2.3.5 Opis ďalších vlastností ľudského vizuálneho systému

Je známe, že ostrejší obraz obyčajne vyzerá lepšie ako pôvodný. Toto často berieme do úvahy pri zdokonaľovaní vzhľadu obrazu pre ľudského pozorovateľa. Taktiež je vo všeobecnosti zaužívané, že práve neprirodený vzhľad upúta pozorovateľovu pozornosť. Pozitívnym aspektom tohto javu je jeho využitie v niektorých oblastiach, ako je napríklad produkcia televíznej reklamy. Negatívnym aspektom javu je, že je často problém vyvinúť úspešný algoritmus počítačového spracovania obrazu.

Vizuálne javy spomínané v predchádzajúcich kapitolách sa dajú pomerne jednoducho vysvetliť na kvalitatívnej úrovni (Lim, 1990, Gonzalez, 1992). Množstvo iných javov nie je možné jednoducho vysvetliť, čo je čiastočne spôsobené nedostatkom našich znalostí. Nevieme napríklad uspokojivo vysvetliť spracovanie obrazu v centrálnej časti ľudského vizuálneho systému. Predstavme si obrázok (skicu) pozostávajúci len z malého množstva čiar reprezentujúcich tvár známeho človeka. Vedecky nie je objasnené, ako si dokážeme tento obrázok spojiť s príslušnou osobou. To dokazuje, že jednoduché obrysy reprezentujúce hrubé črty objektu sú dôležité pre jeho identifikáciu. Tento fakt sa dá využiť v takých aplikáciách, ako napríklad identifikácia objektu pri počítačovej reprezentácii alebo pri vývoji videotelefonov s veľmi nízkou prenosovou rýchlosťou pre nepočujúce osoby.

Spomínané vizuálne javy sa vzťahujú na vnímanie spojeného svetla. V prípade nespojitého svetla (záblesky, blikanie) naše vnímanie závisí vo veľkej miere od jeho frekvencie. Uvažujme nad svetlom, ktoré prebleskuje počas krátkej doby N -krát za sekundu. Pokiaľ je N malé, záblesky svetla sú vnímané oddelene. So zvyšovaním N sa objaví nepríjemné nerovnomerné blikanie. Ďalším zvyšovaním N sa blikanie stane menej zreteľným, až napokon pozorovateľ nedokáže rozoznať, že

intenzita svetla sa mení v závislosti od času. Frekvencia, pri ktorej pozorovateľ začína vnímať záblesky svetla ako spojité svetlo sa nazýva *kritická frekvencia blikania* (critical flicker frequency) alebo *frekvencia splynutia* (fusion frequency). Frekvencia splynutia rastie, ak sa veľkosť a celková intenzita blikania svetla zväčšuje. V prípade, keď vnímame blikanie, je zrková ostrosť najhoršia.

S nespojitým svetlom sa stretávame každodenne. Fluorescenčné svetlá nesvietia spojitou, ako sa nám zdá, ale blikajú s dostatočne vysokou frekvenciou (nad 100 bliknutí za sekundu), preto za normálnych vizuálnych podmienok záblesky nevnímame. Ak sa chceme vyhnúť vnímaniu blikania, je rozhodujúca rýchlosť, akou je obrazovka zobrazovacieho zariadenia (CRT) obnovovaná. V ďalších kapitolách je spomínané, že obrazovky sú iluminované iba počas krátkej časovej periódy. Obyčajne je obrazovka obnovovaná 60-krát za sekundu (NTSC systém). Prekladaniu 2:1 zodpovedá 30 snímok za sekundu. Pre kinofilmy je frekvencia 24 snímok za sekundu, pričom každá snímka je zobrazená dvakrát. Preto je efektívna rýchlosť blikania 48 snímok za sekundu. Pri takých podmienkach ako v kine, kde je veľká tma, sa frekvencia splynutia znižuje pod hranicu 40 bliknutí za sekundu.

Napriek tomu, že každá snímka kinofilmu alebo televízneho vysielania je stále statická a za sekundu sa zobrazí iba konečný počet snímok, objekty na scéne sa javia, akoby sa plynulo pohybovali. Tento efekt, známy ako *vytvorenie pohybu* (motion rendition), má blízky vzťah ku tzv. "phi" javu (Lim, 1990). Uvažujme dva pulzujúce svetelné zdroje vzdialené približne o 1 stupeň zorného uhla pozorovateľa. Nech každé svetlo svieti striedavo 1ms s 10ms prestávkou, potom výsledné svetlo vnímame ako spojité pohybovanie z jedného zdroja do druhého. Keď je časový rozdiel medzi dvomi zábleskami 1ms, tak sa javia súčasne. Keď je časový rozdiel väčší ako 1 sekunda, svetlo sa javí ako dva oddelené záblesky. Toto je známe ako "phi" jav.

Vo všeobecnosti snímkové rýchlosti (frekvencie), ktoré sú dostatočne vysoké na to, aby zabránili blikaniu obrazu, sú vhodné pre vytvorenie pohybu. Fakt, že sa v kinofilmoch alebo pri televíznom vysielaní objekt javí ako plynulo pohybujúci sa, nás neopravňuje tvrdiť, že snímková rýchlosť v časovej oblasti je väčšia ako Nyquistova rýchlosť. Pre objekty s dostatočnou rýchlosťou pohybu je snímanie v čase 24-krát za sekundu alebo 30-krát za sekundu ďaleko pod Nyquistovou rýchlosťou a vzniká časový aliasing. Časový aliasing nespôsobí vždy nespojitost pohybu. Vo filmoch niekedy vidíme, že sa kolesá krúčia opačným smerom. V takomto prípade je síce vytvorenie pohybu prítomné, avšak značný vplyv má aj časový aliasing. Naša momentálna znalosť efektu blikania, vytvorenia pohybu, časového aliasingu a ich vzájomných vzťahov nie je postačujúca. Úplné porozumenie tejto oblasti by bolo užitočné pre mnohé aplikácie, ako je napríklad znižovanie bitovej rýchlosti pomocou vylučovania snímok zo sekvencie snímok obrazu.

2.4 SYSTÉMY PRE SPRACOVANIE OBRAZU

2.4.1 Model systému pre spracovanie obrazu

Typický systém spracovania obrazu, ktorý zahŕňa číslicové spracovanie obrazu, je znázornený na obr. 2.21. Vstupným obrazom (zdrojom) $I(x, y)$ je zvyčajne objekt alebo prírodná scéna, no rovnako to môže byť aj obraz vytvorený iným systémom, ako napríklad filtrom, zobrazovacím zariadením (obrazovkou) alebo videorekordérom. Prevodník konvertuje vstupný obraz na elektrický signál, ktorého amplitúda vyjadruje intenzitu obrazu a digitalizuje tento elektrický signál pomocou A/D prevodníka (Gonzalez, 1987, Ružický, 1995).

Postupnosť diskretných hodnôt $f(n_1, n_2)$ na výstupe prevodníka je následne spracovaná algoritmom digitálneho spracovania obrazu. Tento algoritmus môže byť implementovaný na obyčajnom osobnom počítači, na mikroprocesore, prípadne na špecializovanom zariadení. Špecifický algoritmus závisí od účelu spracovania, možné aplikácie sú napríklad vylepšovanie kvality obrazu, rekonštrukcia, segmentácia, rozpoznávanie, kódovanie obrazu, prípadne kombinácie týchto metód. Výsledok spracovania je na konci procesu zobrazený alebo je možné ho použiť ako vstup do ďalšieho

systému. Ako koncové zariadenie sa zvyčajne zapája obrazovka, fotografický prístroj alebo videorekordér. Pokiaľ je výstupom len nejaká symbolická reprezentácia, ako napríklad pri rozpoznávaní obrazu, možno ako koncové zariadenie použiť tiež tlačiareň.



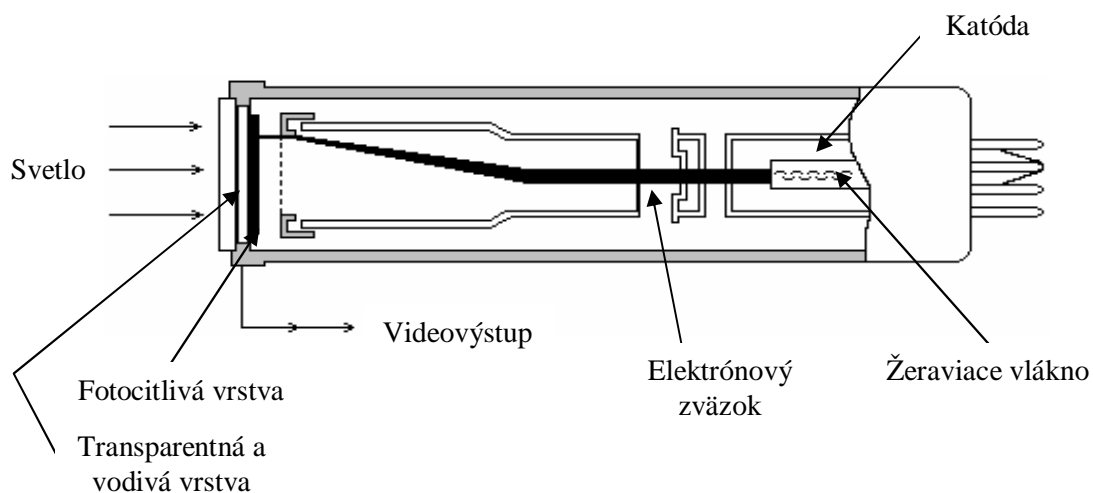
Obr. 2.21 Typický systém spracovania obrazu.

2.4.2 Prevodník

Prevodník konvertuje vstupný obraz na elektrický signál a potom ho vzorkuje použitím A/D prevodníka. Funkcie vykonávané prevodníkom závisia od vstupného zdroja (Gonzalez, 1987, Ružický, 1995).

V prípade, že vstupný zdroj je vo forme obrazu, elektronická kamera konvertuje obraz na elektrický signál a výsledok je digitalizovaný použitím A/D prevodníka. Niektoré kamerové systémy umožňujú meranie intenzity svetla vo viacerých priestorových bodoch súčasne. V typických kamerových systémoch je však možné merať intenzitu svetla len v jednom priestorovom bode v danom čase. V mnohých snímacích systémoch sa sníma obraz podľa vzoru nazývaného *raster*. Intenzita svetla integrovaná nad malou plochou sa zmeria, konvertuje na elektrický signál a prehlási sa za intenzitu (úroveň jas) obrazu v danom priestorovom bode.

V prípade, že vstupom je film alebo fotografia, bežným zariadením používaným na konverziu na elektrický signál je pohyblivý snímač lúčov. V tomto zariadení úzky lúč svetla sníma vstupný zdroj a svetlo odrazené fotografiou alebo prenášané cez film je snímané širokopriestorovými fotodetektormi.



Obr. 2.22 Konštrukcia Vidicon kamery (Lim, 1990).

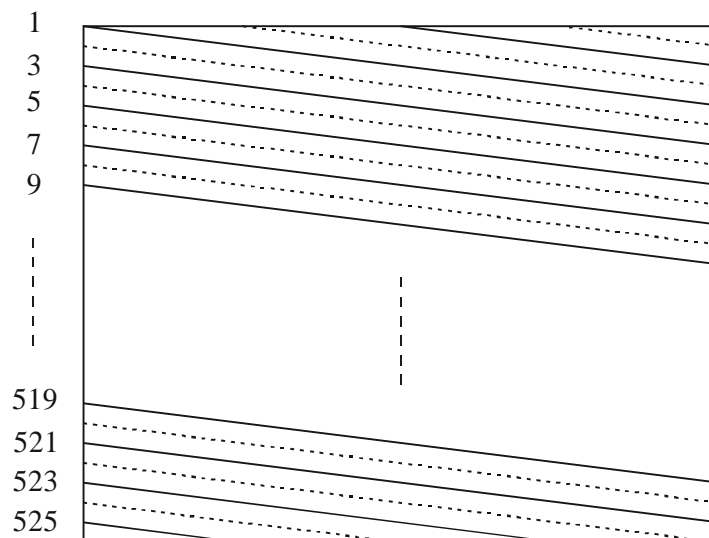
V prípade, že vstupný zdroj je nejaký objekt alebo prírodná scéna, najbežnejším prístrojom na konverziu je kamera, napr. typu *Vidicon*. Konštrukcia Vidicon kamery je na obr. 2.22 (Šonka, 1992, Lim, 1990). Na ľavom konci trubice je vnútri skleneného obalu umiestnená tzv. plocha obrazu. Plocha obrazu má dve vrstvy. Vrchnou je tenká transparentná, elektricky vodivá vrstva oxidu cínu, ktorou prechádza svetlo na druhú vrstvu. Druhá vrstva má povlak z fotocitlivého materiálu. Svetlo zo vstupného zdroja prechádza cez šošovku, opticky hladkú sklenenú plochu a cez prvú, transparentnú vrstvu plochy obrazu. Následne svetlo dopadne na druhú, fotocitlivú vrstvu. Fotocitlivá vrstva plochy

obrazu sa sníma elektrónovou tryskou a výsledný elektrický signál je digitalizovaný A/D prevodníkom. Použitá je snímacia šablóna zľava doprava a zdola nahor.

Pre farebné obrazy sa prichádzajúce svetlo opticky delí vo farebnej kamere na červenú, zelenú a modrú zložku. Každá zložka je vstupom pre trubicu Vidicon kamery. Farebná kamera preto obsahuje tri samostatné trubice. Bežné digitálne obrazy majú rozmery 128x128, 256x256, 512x512 a 1024x1024 bodov. Redukciou počtu bodov sa zníži priestorové rozlíšenie a detaily obrazu sa začnú strácať. Úroveň jasu všetkých bodov je obvykle kvantovaná do 256-tich úrovní (8 bitov na bod). Podobne pre farebný obraz je každá zo zložiek RGB zväčša kvantovaná 8 bitov na bod.

Vidicon kamera patrí ku skupine tzv. *fotovodivých senzorov*, ktoré sa takmer výlučne používali najmä do začiatku 80-tych rokov 20-teho storočia. Od polovice 80-tych rokov nastal rozmach tzv. "solid-state" senzorov, ktoré obsahujú dvojrozmerné pole snímacích elementov integrované na čipe (Šonka, 1992, Schalkoff, 1989). Príkladom "solid-state" senzora je CCD kamera. Po dopade svetla na snímacie pole CCD kamery sa hodnoty intenzity svetla uložia do úložného CCD poľa, ktoré nie je vystavené svetlu a z ktorého sa tieto hodnoty môžu následne čítať. "Solid-state" senzory majú mnoho výhod oproti fotovodivým senzorom. Sú stabilnejšie a kompaktnější. Nevýhodou je napríklad priestorové rozlíšenie. Vyššie priestorové rozlíšenie vyžaduje väčší počet snímacích bodov, čo znamená väčší počet elementov senzora, ktoré musia byť integrované na čipe. Ďalšou nevýhodou je relatívne nízky odstup signálu od šumu. Napriek spomínaným nevýhodám sa predpokladá, že v blízkej budúcnosti "solid-state" senzory nahradia fotovodivé senzory v takmer všetkých TV aplikáciách (Lim, 1990).

V NTSC televíznom vysielaní sa každú sekundu vysiela 30 snímok. Každá snímka sa skladá z 525 horizontálnych čiar (riadkov), ktoré sú rozdelené do dvoch oblastí, párnej a nepárnej. Každá z oblastí je snímaná zľava doprava a zhora nadol, pričom pokrýva $262\frac{1}{2}$ horizontálnych čiar. Nepárna oblasť pozostáva z nepárne očíslovaných čiar a párna oblasť z párne očíslovaných čiar. Horizontálne čiary párnej a nepárnej oblasti sa prekladajú tak, aby tvorili snímku. Tento prístup je zobrazený na [obr. 2.23](#) ako 2:1 prekladanie. 2:1 prekladanie sa aplikuje tak, že vertikálne rozlíšenie je 525 čiar na snímku a snímková frekvencia je 30 snímok za sekundu, pričom frekvencia blikania je 60 za sekundu. Bez prekladania musí byť snímka zobrazená dvakrát, aby sa dosiahla frekvencia 60 bliknutí (obnovení obrazu) za sekundu, čo vyžaduje buď uchovávanie snímok, alebo širšie prenosové pásmo (Lim, 1990).



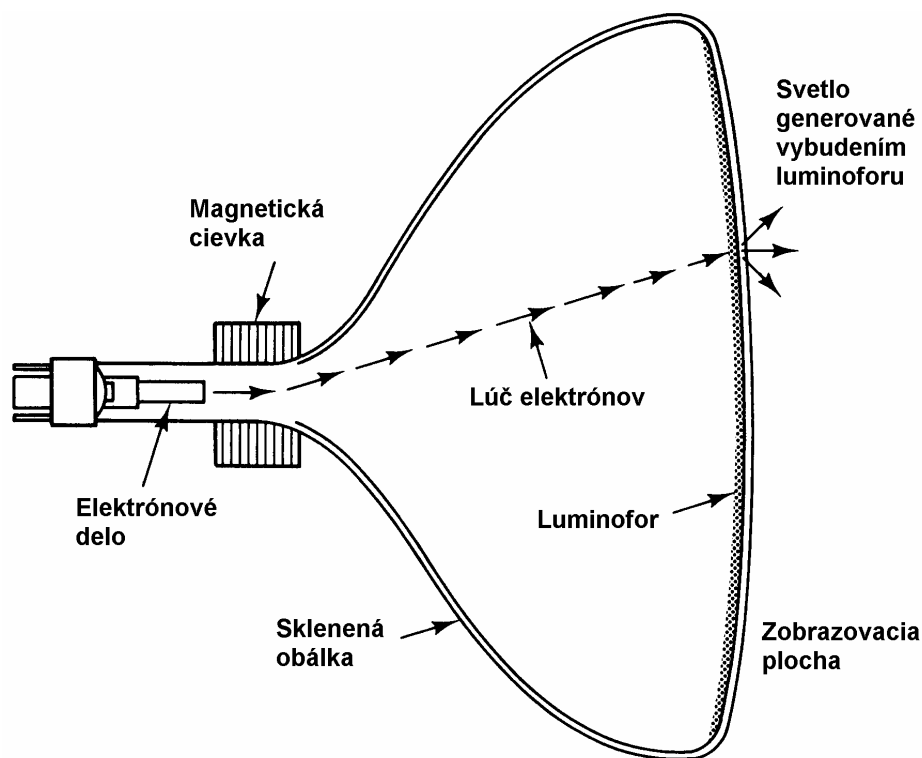
Obr. 2.23 Nepárna (plná čiara) a párna (prerušovaná čiara) oblasť pri 2:1 prekladaní.

Výstup A/D prevodníka je sekvencia čísel. Hoci je výstup na [obrázku 2.21](#) reprezentovaný 2D sekvenciou $f(n_1, n_2)$, môže byť výstup tvorený troma sekvenciami $f_R(n_1, n_2)$, $f_G(n_1, n_2)$ a $f_B(n_1, n_2)$ zodpovedajúcimi červenej, zelenej a modrej zložke farebného obrazu. Výstup môže byť samozrejme aj 3D sekvencia $f(n_1, n_2, n_3)$, ktorá je funkciou dvoch priestorových premenných a

jednej diskkrétnej časovej premennej pre sekvenciu snímok. Tieto signály sa následne spracovávajú algoritmami pre číslicové spracovanie obrazu (Šonka, 1992).

2.4.3 Obrazovka

Najčastejšie používaným zobrazovacím zariadením pri spracovaní obrazu je obrazovka (katódová trubica, elektrónka). Skladá sa z elektrónového dela a fosforeskujúcej plochy - luminoforu (obr. 2.24). Elektrónové delo vysiela lúč elektrónov, ktorý sa pomocou elektrostatických šošoviek vplyvom elektrostatického a magnetického poľa usmerní do úzkej oblasti na fosforeskujúcej ploche. Lúč vybudí luminiscenčnú vrstvu ku generovaniu svetla. V prípade monochromatických obrazoviek sa používa jeden budiaci lúč elektrónov. Pri farebných obrazovkách sa používajú tri nezávislé lúče, každý na generovanie svetla jednej z troch základných farieb. Lúč zvyčajne prechádza obrazovku zľava doprava a zhora nadol za účelom pokrytia celej plochy (Lim, 1990).



Obr. 2.24 Konštrukcia obrazovky (elektrónka).

Ako luminiscenčný materiál sa používa napríklad zinok vo forme sulfidu alebo sulfátu. Pre monochromatické obrazovky sa nanáša tenká celistvá vrstva dovnútra skleneného taniera, ktorý tvorí vonkajší obal obrazovky. Pri farebných obrazovkách je luminofor rozložený do bodov alebo vertikálnych pásov zvlášť pre každú farbu. Pri náraze lúča tvoreného rýchlymi elektrónmi na luminofor sa elektróny atómov v citlivej vrstve excitujú, t.j. posunú na vyššiu energetickú hladinu. Keď sa elektrónový lúč následne presunie do iného bodu, elektróny sa vrátia naspäť na pôvodnú energetickú hladinu, čo má za následok emisiu svetla. Vyžarovanie svetla z obrazovky sa nazýva luminiscencia. Čas, za ktorý sa emitované svetlo utlmí na úroveň jedného percenta zo svojej maximálnej hodnoty, sa nazýva *perzistencia* (stálosť) obrazovky. Pri televíznych obrazovkách sa tento čas pohybuje okolo 5ms.

Obrazovka používaná pri spracovaní obrazu býva spravidla vyššej kvality. Typická obrazovka má pomer strán obrazu (aspect ratio), t.j. pomer šírky ku výške, približne jednotkový a samotná obrazovka je nastavená na zobrazovanie štvorcových snímok. Štandardné zobrazovacie formáty

(rozlíšenia) obrazoviek sú 512 na 512 bodov a 1024 na 1024 bodov, používajú sa však aj iné formáty, napr. 640 na 480, prípadne 1280 na 1024 bodov. Obrazovky súčasných televíznych prijímačov majú pomer strán obrazu 4:3, pre HDTV je pomer 5:3 alebo 16:9 (Lim, 1990, Gonzalez, 1987).