

Dálkový průzkum Země

ZPRACOVÁNÍ DAT

RNDr. Ladislav Plánka, CSc.

Institut geodézie a důlního měřictví, Hornicko-geologická fakulta, VŠB – TU Ostrava

*Podkladové materiály pro přednáškový cyklus předmětu „Dálkový průzkum Země“
(jazyková ani odborná korektura neprovedena)*

Obraz, obrazová data

- Označme měřenou radiometrickou/fotometrickou veličinu, jejíž velikost je vždy vztažena k určitému místu v krajině, tedy např. k souřadnicím (x,y) , písmenem f .
- Tato veličina je závislá na vlnové délce λ , čase t jejího zjišťování a zvolené polarizační rovině p .
- Pro každou sestavu (vlnová délka, čas, polarizační rovina) nabývá tato veličina pouze jediné konkrétní hodnoty.

Obraz, obrazová data

- Na daném místě (x,y) můžeme v L vlnových délkách λ , v T časových okamžicích t a v P polarizačních rovinách p zjišťovat hodnoty veličiny f , a tak se k tomuto místu vztahují hodnoty veličiny f :

$$f_{\lambda 1}(x,y), \dots, f_{\lambda L}(x,y), f_{t 1}(x,y), \dots, f_{t T}(x,y), f_{p 1}(x,y), \dots, \dots, \\ f_{\lambda p} P(x,y) = f_1(x,y), \dots, f_M(x,y)$$

- Celý soubor měřených hodnot můžeme vyjádřit jednou M -rozměrnou vektorovou funkcí $f(x,y)$, jejíž složky jsou $f_m(x,y)$, přičemž $m = 1, \dots, M$.

Obraz, obrazová data

- Poloha měřeného bodu je zpravidla udávána v rovině pravoúhlými souřadnicemi x a y , případně zeměpisnými souřadnicemi φ a λ . V případě potřeby se používá i výšková souřadnice z , resp. h . Přitom platí, že:

$$0 < x < X, \quad 0 < y < Y,$$

kde X a Y jsou konstanty udávající rozměr zájmového území.

- Z matematického hlediska tento vztah představuje definiční obor funkce $f(x,y)$.
- Protože měřená radiometrická/fotometrická veličina má jen nezápornou a konečnou hodnotu, je i každá složka výsledné funkce nezáporná a omezená.

Obraz, obrazová data

Prostorová lokalizace hodnoty $f_m(x,y)$ je pro dálkový průzkum charakteristická.

Její přímým důsledkem je prostorová prezentace funkčních hodnot v grafické podobě, a proto se funkce $f_m(x,y)$ označuje také jako **obrazová funkce** a její naměřené hodnoty jako **obrazová data** a konečně celý naměřený soubor dat jako **obraz**.

Obraz, obrazová data

Uspořádáme-li hodnoty f_m do:

- sloupců (počet i) a
- řádků (počet j), pak

vznikne obraz (obrazový soubor).

- Velikost obrazového souboru (v pixelech) je:

$$OP = i \times j$$

- Velikost obrazového souboru (v bytech) je:

$$OB = OP \times A$$

$$A = 1/8 \text{ (pro 1 bitová data)}$$

$$A = 1 \text{ (pro 8 bitová data)}$$

$$A = 3 \text{ (pro 24 bitová data)}$$

Obraz, obrazová data

Obrazové souřadnice mohou být udávány také ve tvaru:

P, L (Pixel, Line).

tj. sloupec, řádka (nebo opačně). Známe-li skutečnou velikost pixelu v metrech, pak můžeme i z této soustavy přejít na absolutní souřadnice.

Obraz, obrazová data

- Technická procedura převodu naměřených dat do obrazové podoby se označuje jako **vizualizace dat**.
- Je to plošné vyobrazení průběhu funkce $f_m(x,y)$ pomocí barevných, resp. černobílých bodů, kdy stejným funkčním hodnotám odpovídají stejné barevné odstíny (barevný obraz), resp. stejné odstíny šedi (černobílý obraz).
- U černobílých obrazů odpovídá obvykle stupnice šedi zvyklosti černobílé fotografie, tedy menším hodnotám $f_m(x,y)$ odpovídají tmavší odstíny.

Druhy obrazových dat

Soubor funkčních hodnot $f(x,y)$ představuje vícerozměrný obrazový soubor (víceobraz).

Jeho rozměrnost je dána počtem složek vektoru $f(x,y)$ neboli počtem obrazových složek, který je roven M . Rozlišujeme:

- **multispektrální obraz** - $L > 1$, T a $P = 1$
- **multitemporální obraz** - $T > 1$, L a $P = 1$
- **multipolarizační obraz** - $P > 1$, L a $T = 1$

Obraz, obrazová data

- Obrazová funkce obecně nemá náhodný charakter (opačné tvrzení lze snad přijmout jen ve velmi výjimečných případech na zvláště vybraných místech na Zemi nebo až pro zpracování dat v celosvětovém měřítku).
- Frekvenci (četnost) výskytu jednotlivých hodnot obrazové funkce udává **histogram obrazu (sloupcový diagram)**, který může být zpracováván jednak jako vícerozměrný pro několik nebo všechny užité spektrální záznamy naráz, jednak, a to častěji, pro každý monochromatický obraz samostatně.

Úlohy dálkového průzkumu

Základním principem zpracování dat dálkového průzkumu je nalézt **souvislost mezi naměřenou radiometrickou veličinou $f(x,y)$** , kterou může být např. zářivý tok, intenzita záření, zář apod. **a vnitřními parametry $s(x,y)$ látkového prostředí**, které záření odrazilo a/nebo vyzářilo.

Úlohy dálkového průzkumu

- **Přímá úloha:** Jsou-li v daném místě (x,y) známy všechny vnitřní parametry $s(x,y)$ látkového prostředí a všechny charakteristiky dopadajícího záření, pak lze určit radiační veličiny $f(x,y)$ popisující záření vycházející z látkového prostředí daného místa .
- **Nepřímá (obrácená) úloha:** Jsou-li v daném místě (x,y) známy radiační veličiny $f(x,y)$ popisující záření vycházející z látkového prostředí daného místa a všechny charakteristiky dopadajícího záření, pak lze určit všechny vnitřní parametry $s(x,y)$ látkového prostředí. **Tato úloha je typická pro praktické aplikace dálkového průzkumu.**

Úlohy dálkového průzkumu

- Obě úlohy dálkového průzkumu jsou jednoznačně řešitelné jen tehdy, je-li znám vztah mezi vektorovými funkcemi $f(x,y)$ a $s(x,y)$.
- Obecně platí:

$$f(x, y) = A[s(x, y)]$$

(A je přenosová funkce atmosféry, která tento vztah formalizuje)

Zpracování dat

Zpracování dat

- Analogové:
 - časově velice náročné,
 - výrazně subjektivní, tzn. že se obtížně rekonstruují použité klasifikační postupy,
 - minimálně využívá výpočetní techniky,
 - obtížně se nasazuje na rozsáhlejší soubory obrazových dat.
- Digitální:
 - odstraňuje výše uvedené vlastnosti analogového zpracování,
 - minimalizace zásahu subjektu však může kvalitu interpretace i významně snížit – i zde platí „*zkušenost je zkušenost*“.

Analogové zpracování dat

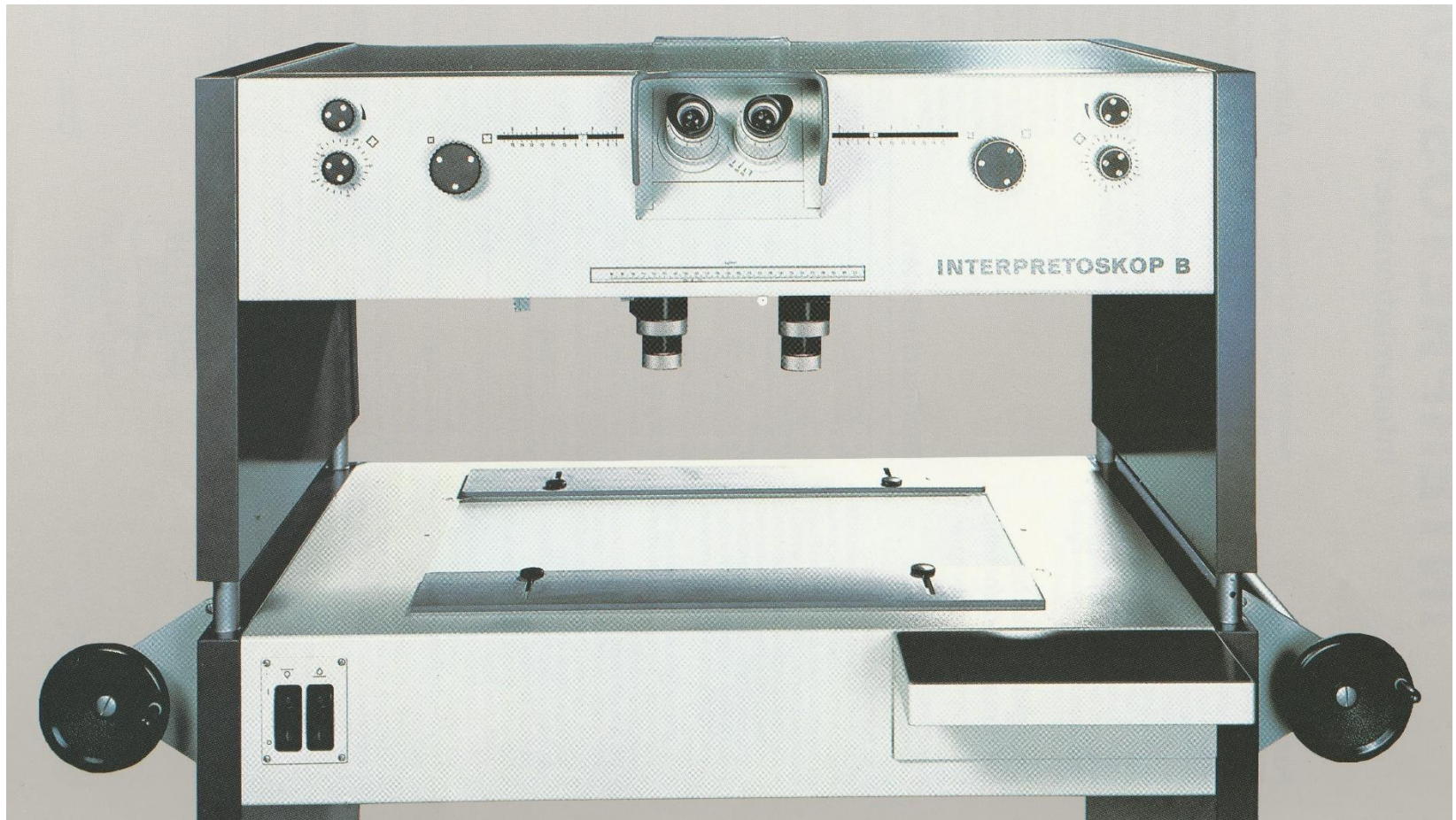
Analogové zpracování dat

- V současné době pokládám tuto metodu pouze za prvotní, rychlé a orientační určení kvalitativních a kvantitativních parametrů vybraných zájmových objektů, jež předchází následnému digitálnímu zpracování dat dálkového průzkumu v celé šíři kombinačních možností.
- Výrazným rysem této metody je subjektivizace zpracování dat, byť i na základě maximálního využití zkušeností.
- I přes naznačené jiné možnosti, jsou analogovými metodami zpracovávány jak fotografické snímky (analogové i digitální), tak vizualizovaná obrazová data. Lze je tedy zahrnout i pod dříve běžně užívaný pojem **fotointerpretace** (byť v původně mírně jiném smyslu slova).

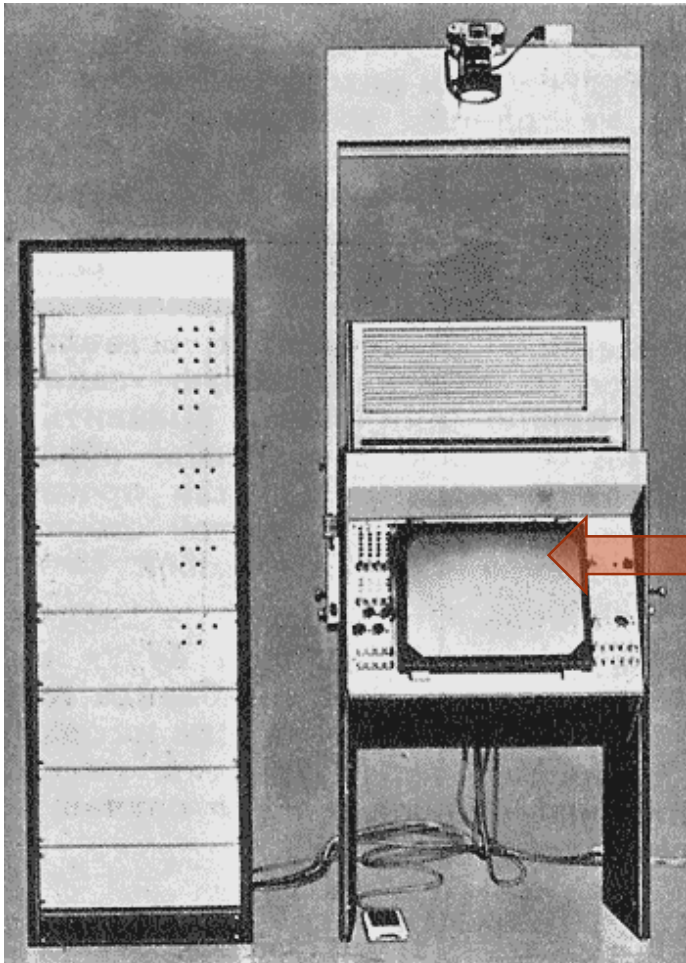
Přístrojová technika

- Fotogrammetrické přístroje a zařízení (pozor na nutnost výrazně větších zvětšení než u leteckých snímků),
- Směšovací projektory (např. MSP 4 firmy Zeiss a MDS firmy NAC),
-

Přístrojová technika

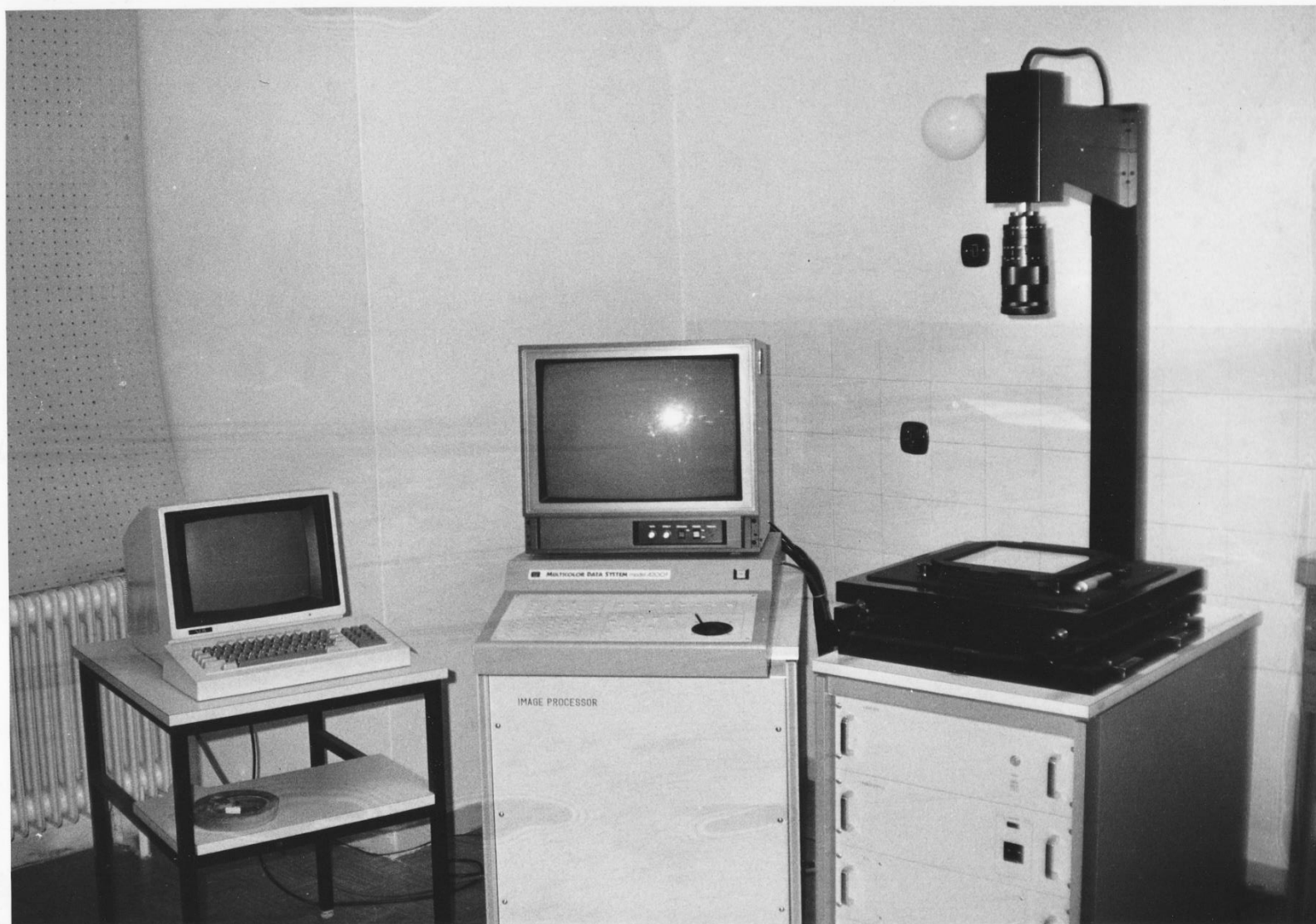


Směšovací projektor MSP 4



Kontakní výstup z matrice

Směšovací projektor MDS



Vizuální interpretace

- Interpretací obrazového záznamu rozumíme **zpracování informace**, kterou v sobě skrývá, **do podoby, která je přístupná dalšímu uživateli**.
- Obyčejně se jedná o extrakci konkrétní informace (např. podmáčené plochy na zemědělských půdách) a potlačení redundantních, rušivých nebo zastírajících dat (např. fenofáze zemědělské kultury).

Interpretační znaky

- **Obrazový záznam** snímaných objektů je vytvořen konkrétním snímacím zařízením na záznamové medium, kde se prezentuje především souborem jejich optických a tvarových vlastností.
- Soubor těchto vlastností, které zůstávají za určitých podmínek neměnné a umožňují tak definovat druh a stav konkrétního objektu, označujeme jako soubor **interpretačních znaků**.

Interpretační znaky

Lze rozdělit na:

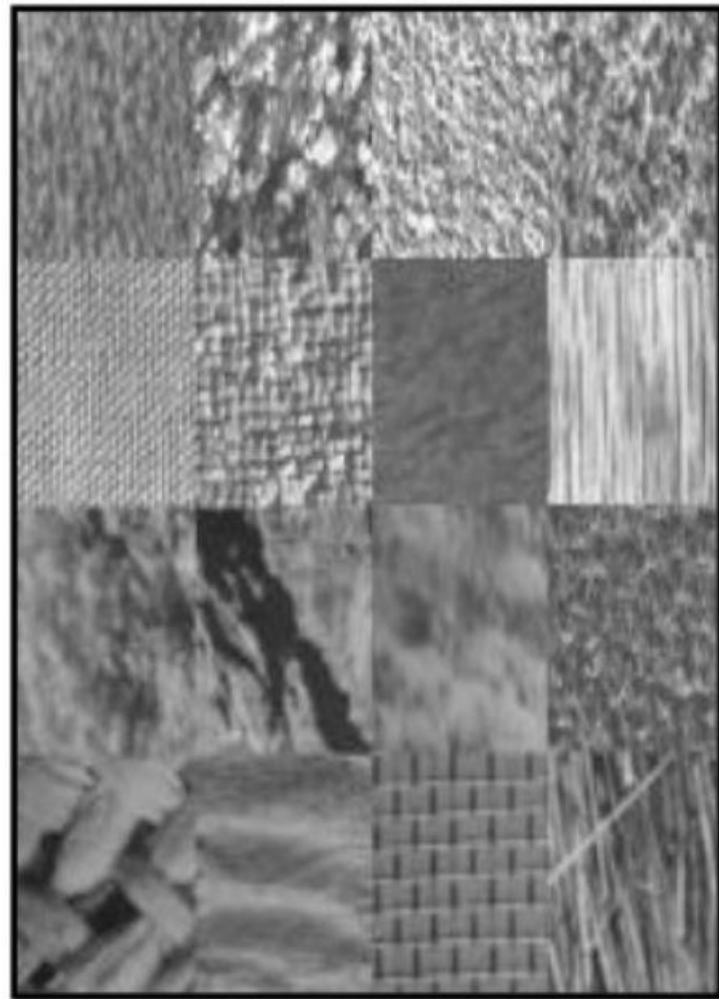
- **přímé skutečné**, které existují jak na snímku, tak i ve skutečnosti (tvar, barva, rozměr, stín),
- **přímé neskutečné**, které existují jen na snímku (textura, struktura, tón),
- **nepřímé**, které využívají druhotné znaky (poloha, sousední objekty, příčinné souvislosti).

Interpretační klíč

Některé interpretační znaky jsou pro určité jevy nebo objekty natolik charakteristické, že vedou ke konstrukci **interpretačních klíčů**, které mohou mít platnost:

- obecnou nebo ro vybranou skupinu objektů,
- globální nebo regionální, resp.
- trvalou nebo časově omezenou.

Jednotlivé položky interpretačních klíčů obvykle označujeme jako **třídy**.



Ilustrativní příklad interpretačního klíče na základě textury (vysvětlivky nepřipojeny)

Interpretační klíče

- Vyjadřují vztahy mezi vzhledem objektů na snímku a jejich skutečným vzhledem při pozemním pozorování, plní tedy funkci „slovníku“.
- Interpretační klíče jsou nejčastěji vytvářeny pomocí interpretačních znaků z „**učebních ploch**“, tedy snímkových areálů, které znázorňují známý objekt se známými druhovými parametry.
- Lze vytvořit i interpretační klíče:
 - výběrové, což jsou komentované výřezy snímků, řazené podle příbuzných skupin jevů; postupují od obecného ke zvláštnímu v rámci jednotného měřítka.
 - vylučovací (dichotomní) jsou textové, mají formu rozhodovacího stromu.

Vizuální interpretace

- Vizuální interpretace obrazových dat se obvykle provádí na základě porovnání objektu na snímku se vzorovými ukázkami, které jsou uvedeny v interpretačním klíči.
- Často se pracuje eliminační metodou, kdy se postupně pro každý objekt vylučuje jeho zařazení do jednotlivých tříd interpretačního klíče a v akceptované třídě do intervalů hodnot jednotlivých stavových parametrů až je tento objekt „jednoznačně určen“.

Vizuální interpretace

- Vizuální interpretace by neměla probíhat bez předchozí přípravy, tj. shromáždění všech dostupných informací o vyhodnocovaném území (literárních, mapových, fotografických aj.).
- Osobní rekognoskace klíčových ploch z hlediska vizuální interpretace může být pro kvalitní posouzení snímkových materiálů jen přínosná.

Vizuální interpretace

Vlastní vizuální interpretace tedy obsahuje:

- výběr a vyhodnocení charakteristických homogenních oblastí (učebních, klíčových ploch) a určení jejich vlastností s využitím interpretačních znaků (tj. **definování interpretačního klíče**),
- vyhodnocení neznámých ploch/oblastí (**jejich řazení do příslušných tříd podle interpretačního klíče**) se zvláštním důrazem na vyznačení nejasných a sporných území,
- **verifikaci** výsledků vizuální interpretace, kterou lze provést, obvykle namátkově, a to:
 - srovnáním se skutečností v terénu (pokud ovšem mezi snímkováním a vizuální interpretací neuplynula příliš dlouhá doba) nebo tak, že
 - vizuální interpretaci, především sporných a nejasných území, provede, nezávisle na původní, jiná osoba.

Digitalizace obrazu

Digitalizace obrazu představuje:

- **vzorkování** – „rozdělení obrazu na snímané body“ – pixely (nutno volit vhodné rozlišení, abychom vůbec danou informaci zaznamenali),
- **kvantování** – přiřazení číselných hodnot jednotlivým jasovým hladinám,
- **binární reprezentace** – vlastní forma kódování pro zápis do datového souboru.

Vzorkování (1/2)



Originál 256 × 256

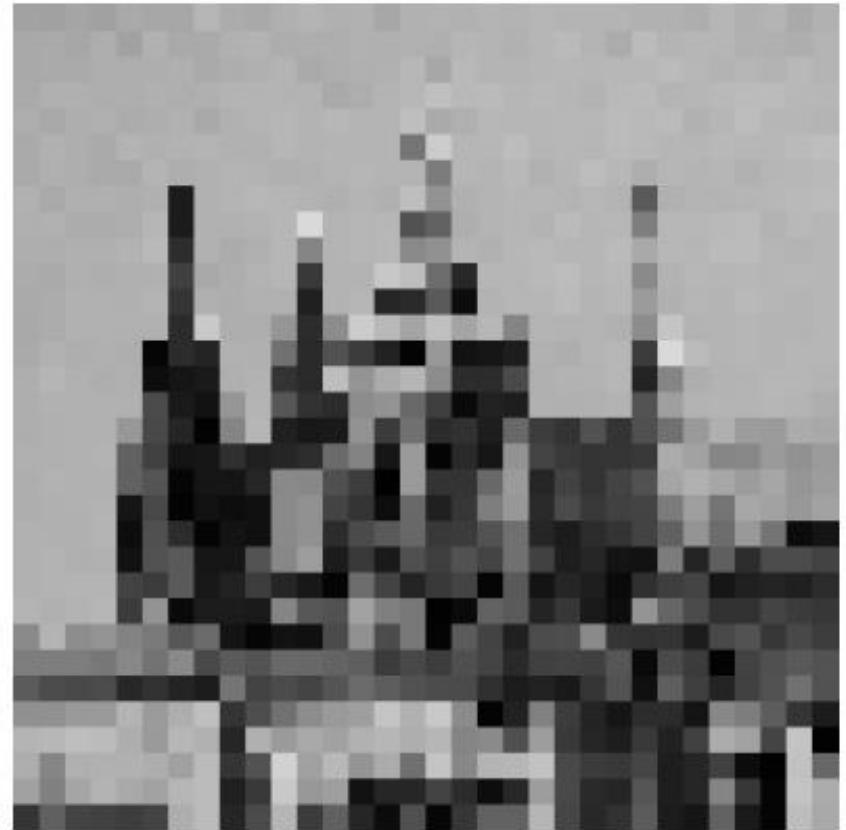


128 × 128

Vzorkování (2/2)



Originál 256×256



32×32

Kvantování (1/3)



Originál 256 jasových úrovní



64 jasových úrovní

Kvantování (2/3)



Originál 256 jasových úrovní



4 jasové úrovně

Kvantování (3/3)



Originál 256 jasových úrovní



2 jasové úrovně

Digitální zpracování dat

Digitální zpracování dat

- Digitální zpracování se týká především primárně získaného digitálního obrazu, který je takto vytvořen konstrukcí snímacího zařízení (např. zobrazující skenery, digitální kamery).
- V malé míře jsou pořizovány digitální obrazové záznamy sekundární digitalizací analogově pořízeného obrazu (např. skenováním fotografického snímku).

Digitální zpracování dat

- Digitální obraz chápeme jako **obrazovou informaci, která je převedená do číslicové podoby**. Zahrnuje v sobě jak informace topografické (geometrické), tak informace tematické.
- Vzhledem k tomu, že reálný svět má prakticky neomezenou geometrickou rozlišovací schopnost (např. až do velikosti elementárních částic hmoty), je nutno při zobrazení reality počítat s jistým stupněm generalizace, která závisí na technických možnostech i způsobu pořízení a využití dat.
- To znamená, že je **třeba zvolit určitou konečnou největší rozlišovací úroveň, neboli obrazový element určité velikosti, který bude dále nedělitelný a s kterým budeme pracovat**.

Digitální zpracování dat

- Pro elementární část obrazu se ustálil název **pixel** (z angl. picture element).
- Jednotlivé pixely nabývají určitého stavu a tato informace je opět s určitým technickým omezením kódována.
- Výsledný digitální obraz se tedy skládá z množství na sebe navazujících pixelů ve vodorovném a svislém směru, které nabývají jistých kódových hodnot měřené radiometrické/fotometrické veličiny. Nejčastěji je kódována odrazivost studovaného objektu/jevu spolu s jeho emisivitou. Kódované hodnoty při jejich vizualizaci určují „barvu“ pixelu; všechny jako celek pak vzhled obrazu.

Digitální zpracování obrazových dat dálkového průzkumu zahrnuje tyto hlavní typy operací:

- předzpracování obrazových záznamů,
- zvýraznění obrazu,
- extrahování informace, které zahrnuje především tzv. klasifikaci obrazu (nahrazuje vizuální interpretaci interpretací automatickou) a postklasifikační úpravy,
- analýza obrazových dat (studium dynamiky jevů, modelování s obrazovými daty aj.),
- spojování dat s jinými obrazovými daty a jejich vstup do GIS.

Předzpracování obrazových záznamů

Předzpracování obrazových záznamů

Předzpracováním obrazových záznamů, tj. **rektifikací a restaurací dat** se provádí počáteční zpracování surových dat (*většinou již na úrovni pořizovatele dat, který má dokonalou znalost technických parametrů radiometrů a jejich nosičů, jakož i parametrů vlastních letových tras a podmínek letu*).

Patří sem např. odstranění náhodných a systematických chyb, úprava geometrických zkreslení a radiometrická kalibrace, potlačení poruch obrazu, eliminace šumu aj.).

Významnou součástí fáze předzpracování obrazových záznamů jsou jejich:

- **geometrické korekce,**
- **radiometrické korekce.**

Geometrické korekce

Odstranění geometrických chyb, jejichž zdroji jsou např.:

- změny výšky letu, polohy a rychlosti letu nosiče,
- zakřivení Země a její rotace,
- výškové změny reliéfu terénu,
- vlastnosti senzoru.

Pro geometrické korekce jsou používány tyto pojmy:

- **Rektifikace** – obecný proces transformace polohy všech obrazových prvků z jednoho souřadnicového systému do druhého.
- **Ortorektifikace** – rektifikace, při níž jsou odstraněny i nepřesnosti vznikající v důsledku relativní změny polohy objektů, plynoucí z jejich různé nadmořské výšky.
- **Registrace** – úprava souřadnicových systémů dvou rozdílných obrazů na stejný souřadnicový systém.
- **Georeferencování** – určení absolutní polohy alespoň jednoho prvku obrazu.
- **Geokódování** – rektifikace provedená do konkrétní kartografické projekce (produktem jsou tzv. geokódovaná data).

Obecný postup rektifikace obrazu pomocí identických bodů:

- sběr identických/vlícovacích bodů (problém – velikost pixelu),
- volba transformace (rozhoduje o počtu nutných identických/vlícovacích bodů), její výpočet a testování,
 - polynom 1. řádu tj. podobnostní (posunutí otočení, změna měřítka ve směru řádků a sloupců – stačí dva páry bodů), afinní (posunutí, otočení, zkosení – 3 páry identických bodů), kolineární (měřítko ve směru řádků a sloupců se mění nezávisle – 4 body),
 - polynomy vyššího řádu (2. řád – minimálně 6 bodů, 3. řád – 10 bodů, 4. řád – 15 bodů, 5. řád 21 bodů atd.), které mohou být nahrazeny splineovou funkcí (definuje se transformační funkce s minimální křivostí mezi každým párem identických bodů – vyžaduje vysoké počty identických bodů, zvláště u členitého georeliéfu),
- vlastní rektifikace obrazu (aplikace transformačních rovnic na zdrojová data),
- převzorkování (viz dále).

Převzorkování (resampling)

- Na **principu nejbližšího souseda**, kdy se hodnota nového pixelu **nepřepočítává**, ale přebírá se hodnota nejbližšího pixelu. *Jevy ve výstupní matici mohou být prostorově mimo až o polovinu rozměru pixelu, což může způsobit nespojitý obraz na výsledném produktu.*
- Pomocí **bilineární transformace**, kdy se bere v úvahu **vážený průměr digitálních hodnot 4 nejbližších pixelů** z distorzní matice, což je dvourozměrná obdoba lineární interpolace. Výsledkem je spojitý vyhlazený převzorkovaný obraz. *Tento postup mění úroveň šedi původních dat, a proto je vhodné provádět převzorkování až po provedení klasifikace obrazového záznamu.*
- Pomocí **kubické konvoluce**, kdy se bere v úvahu **matice 4 x 4 pixelů, obklopujících výstupní pixel**. Výsledkem je spojitý vyhlazený převzorkovaný obraz, který je mírně ostřejší než u bilineární transformace. *Původní naměřená data se však nezachovávají obdobně jako u bilineární transformace.*

Resampling – přiřazení hodnoty

Input Cells Used by Each Resampling Method for the Current Target Cell

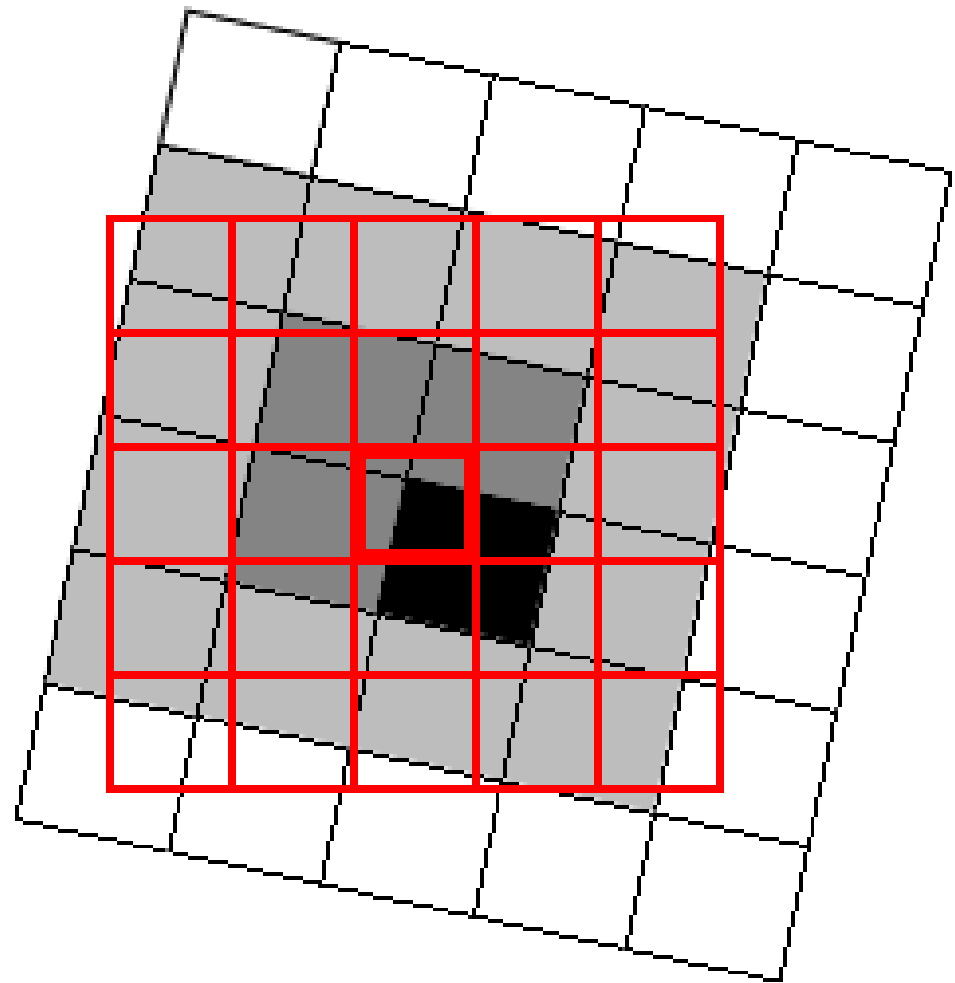
Nearest Neighbour



Bilinear Interpolation



Cubic Convolution



Radiometrické korekce obsahují:

- opravy dané kalibrací přístrojů,
- opravy ze změny ozáření,
- opravy náhodných radiometrických chyb,
- opravy vyplývající z geometrie letu,
- opravy ze stavu atmosféry.

Radiometrické opravy, především ty jež vyplývají z páskování, je třeba provést před geometrickou korekcí. Není na ně žádná „norma“.

Opravy dané kalibrací přístrojů

- Naměřené hodnoty odrazivosti/emisivity objektů závisí na přesné kalibraci měřícího zařízení (radiometrů).
- Kalibraci provádí většina systémů automaticky, např. periodickým snímáním určitých referenčních ploch o známých radiačních vlastnostech, porovnáváním s hodnotami vnitřních etalonů přístrojů aj.

Kompenzace sezónních rozdílů (opravy ze změny ozáření)

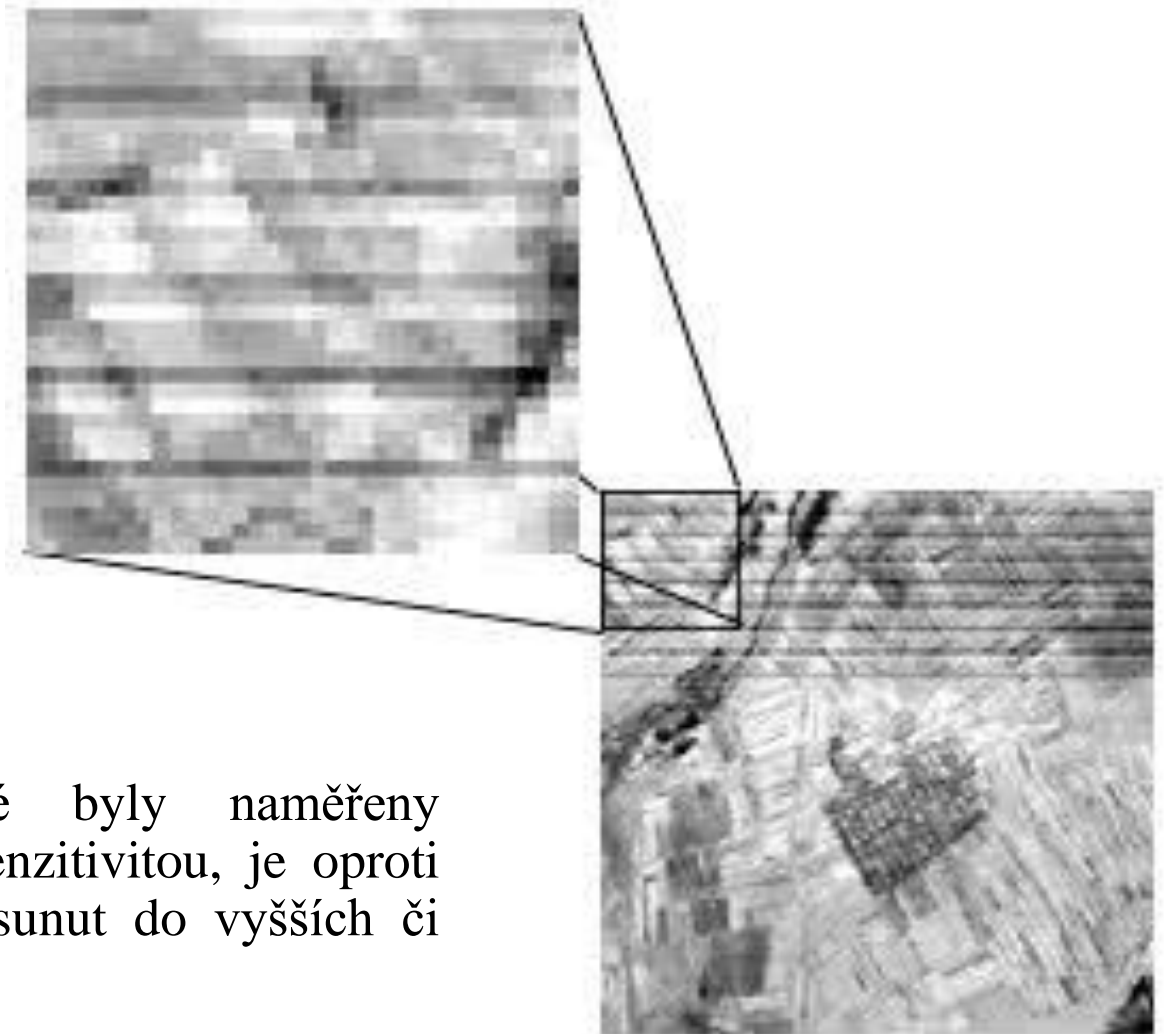
- Zpracovávané „surové“ obrazové záznamy mají velmi rozdílné DN hodnoty pro stejné povrchy. Tyto rozdíly jsou dány i rozdílnou výškou Slunce (v závislosti na roční a denní době).
- Při interpretaci řady obrazových záznamů z různé části roku/dne výrazně ovlivňují studium časových změn chování radiometrických vlastností objektů/jevů závislých např. na půdní vlhkosti.
- Proto se opravy ze změny ozáření řeší normalizací výšky Slunce na pozici družice v zenitu (jiným způsobem, jak eliminovat efekt výšky Slunce, je např. použití podílů obrazových matic vybraných pásem multispektrálního obrazu).

Efekt vzniklý měnící se vzdálenosti Země – Slunce lze ve většině běžných úloh DPZ zanedbat.

Opravy náhodných radiometrických chyb představují především:

- **nepřesný nebo zcela chybějící řádek** obrazového záznamu chybnou kalibrací senzorů, jeho technickým výpadkem, či při přenosu dat na přijímací stanici – lze např. **nahradit zprůměrováním hodnot ze sousedních řádků**.
- **„páskování“** při příčném skenování u mechanooptických skenerů (MSS každý 7. řádek u TM každý 8. řádek apod.) – **lze odstranit např. úpravou průměru nebo přizpůsobením histogramu**. *Tentýž jev je při podélném skenování u optickoelektronických skenerů obtížně odstranitelný (CCD senzor skenuje celý řádek naráz a výpadek jednoho ze senzorů se může projevit různým způsobem).*
- **„bitové chyby“** – nepravidelné hodně světlé, či hodně tmavé skvrny v obraze – **lze odstranit vhodným filtrem (pozor filtr pracuje po celé ploše obrazového záznamu!**

Páskování (pruhování, striping, banding)



Histogram řádků, které byly naměřeny detektorem s rozdílnou senzitivitou, je oproti ostatním histogramům posunut do vyšších či nižších hodnot.

Opravy ze stavu atmosféry

- Metoda nejtmavšího pixelu (nad vodou).
- Metoda regresní analýzy (srovnání pozemních a distančních měření).
- Modelování za použití atmosférických modelů (vstupují do nich meteorologická data).

Zvýraznění obrazu

Zvýraznění obrazu

Obraz se vylepšuje pro další interpretaci (upraví se jeho vzhled a zvýší se vizuální odlišení mezi jednotlivými prvky obrazu, čímž se zvětší množství informací, které lze **vizuálně** interpretovat).

Žádný obecný postup neexistuje.

Úpravy je vhodné provádět pouze na monitoru (záložním souboru dat) a nezasahovat do zdrojových dat.

Zvýraznění obrazu

Základní skupiny digitálního zvýraznění obrazového záznamu by mohly být:

- **bodové (radiometrické) zvýraznění**, tj. manipulace s odstíny šedé,
- **prostorové zvýraznění (filtrace)**,
- **spektrální zvýraznění** (současná manipulace s dvěma a více spektrálními záznamy) a
- **zvýraznění textury**.

Bodové (radiometrické) zvýraznění

- Radiometrické zvýraznění pracuje s histogramem obrazu a s tzv. **zobrazovací funkcí** či **zobrazovací tabulkou** (LUT – Look Up Table).
- **Zobrazovací funkce** přiřazuje určité DN hodnotě pixelu na vstupním (originálním) obraze novou hodnotu DN ve výsledném (zvýrazněném) obraze.

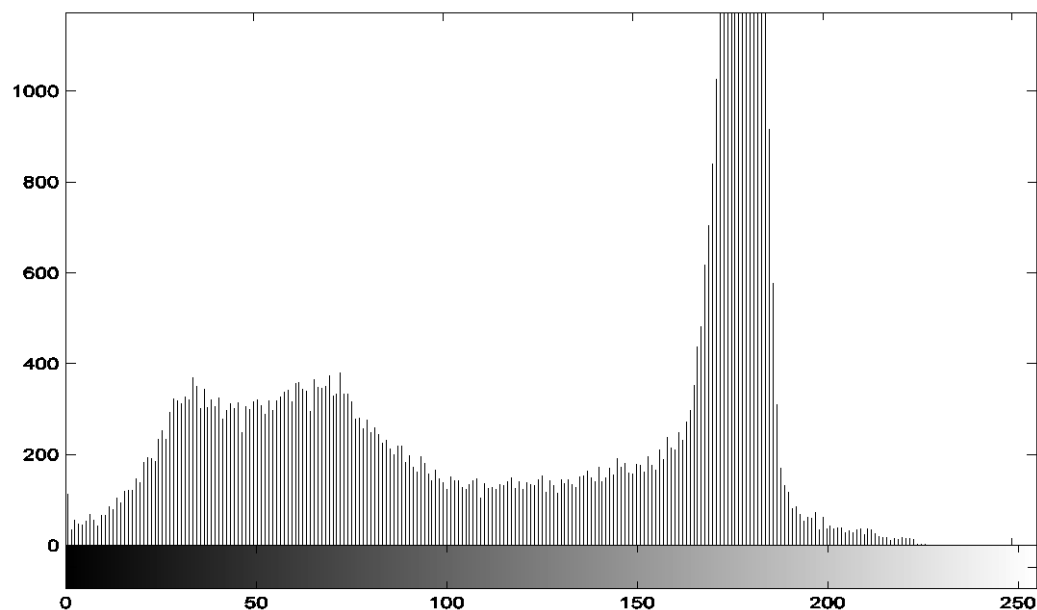
Histogram

- Histogram vyjadřuje rozdělení četnosti jednotlivých jasových úrovní.
- Každý digitální obraz má svůj histogram (celkový i dílčí pro jednotlivé barvy, ze kterých je složen).
- Histogram obrazu zpětně neurčuje daný obraz.

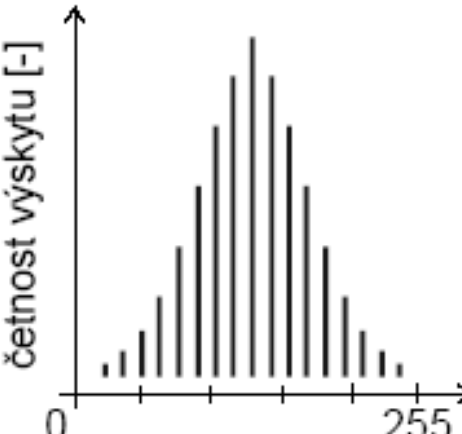
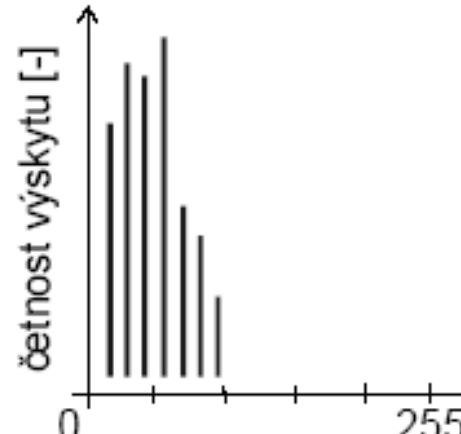
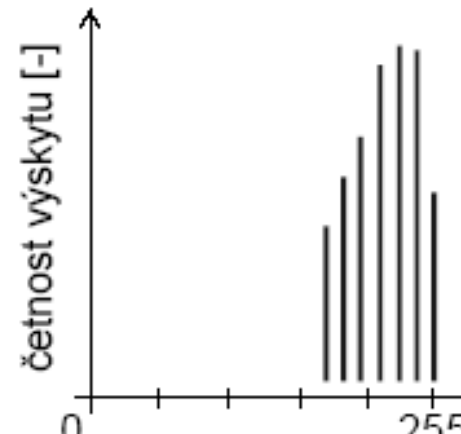
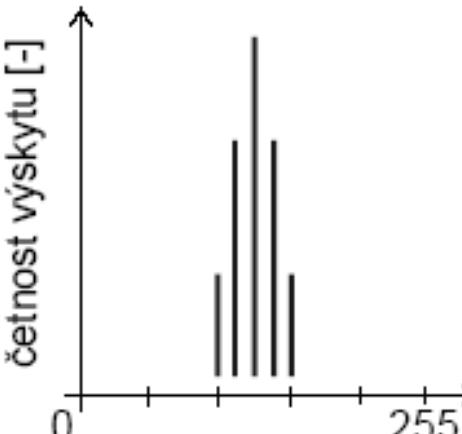
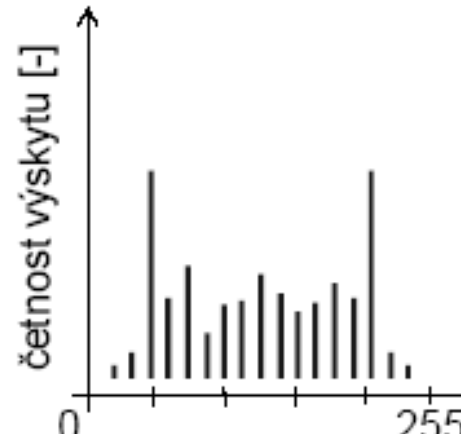
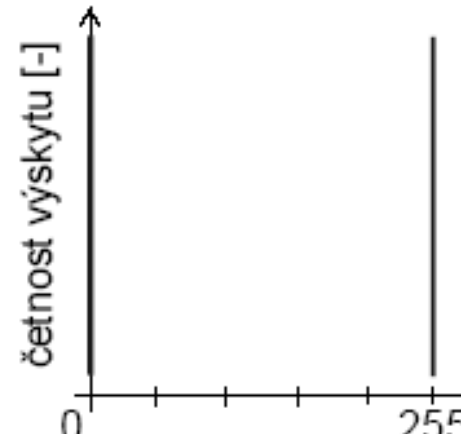
Obraz



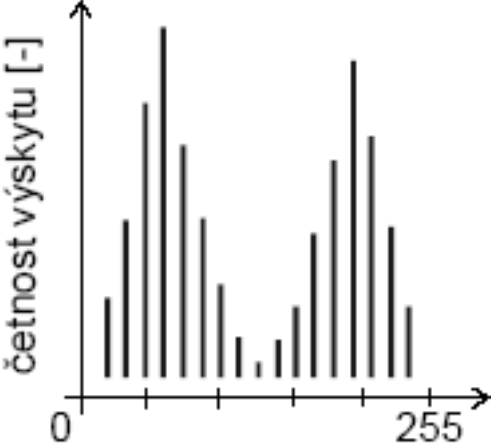
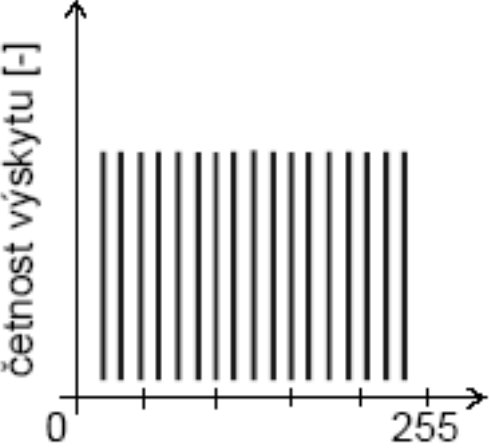
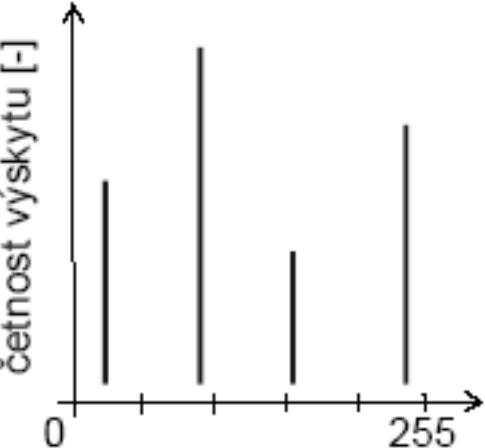
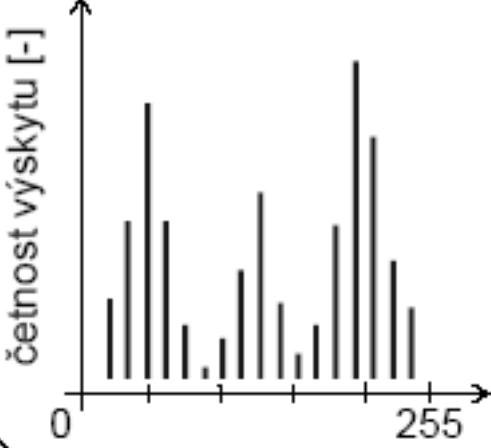
Histogram



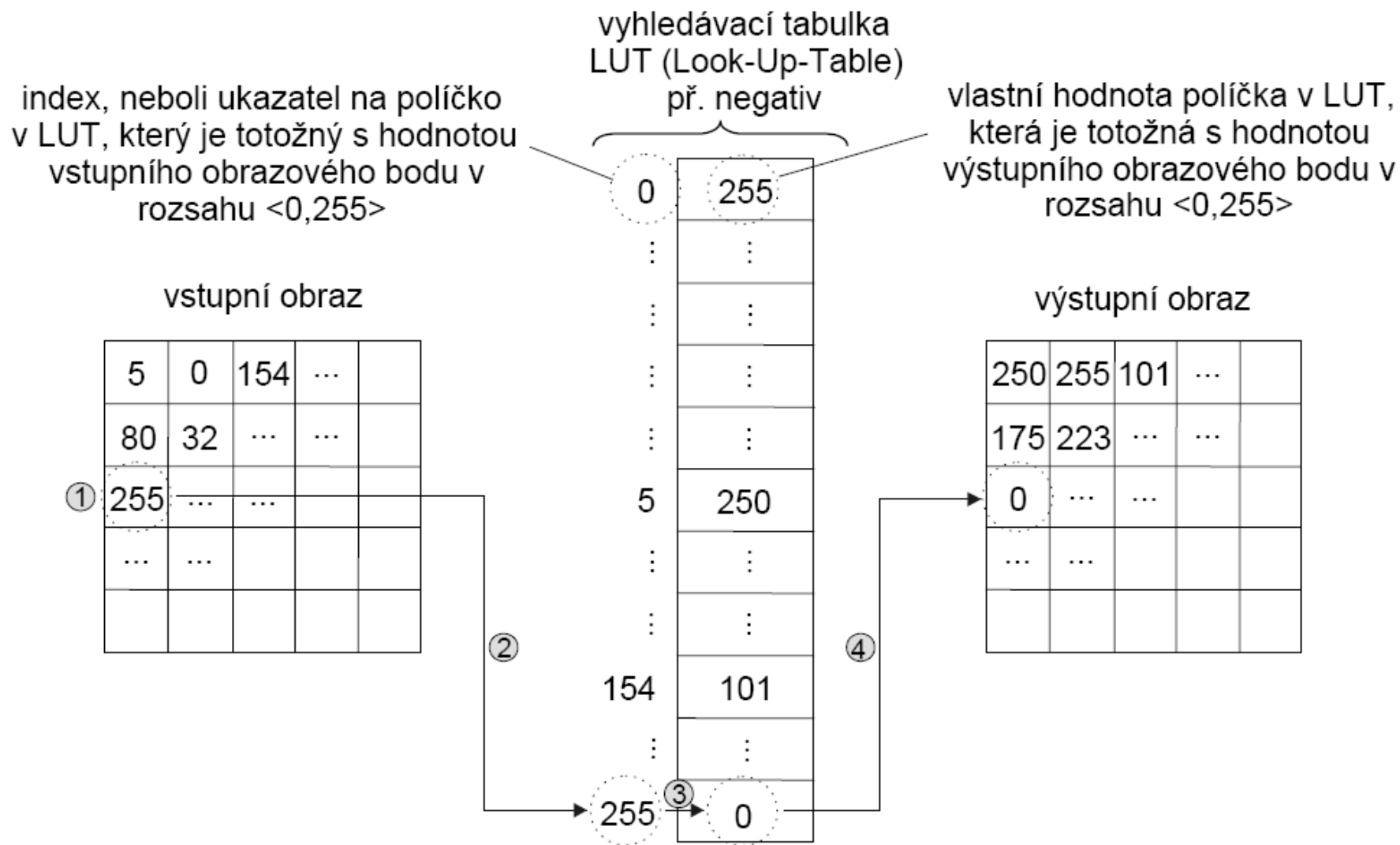
Různé typy histogramů obrazu a některá důležitá pravidla

Reálný optimální histogram	Tmavý obraz	Světlý obraz
<p>četnost výskytu [-]</p>  <p>0 255</p> <p>hodnota obraz. bodu</p> <p>1</p>	<p>četnost výskytu [-]</p>  <p>0 255</p> <p>hodnota obraz. bodu</p> <p>2</p>	<p>četnost výskytu [-]</p>  <p>0 255</p> <p>hodnota obraz. bodu</p> <p>3</p>
Obraz s nízkým kontrastem	Obraz s normál. kontrastem	ČB obraz, max. kontrast
<p>četnost výskytu [-]</p>  <p>0 255</p> <p>hodnota obraz. bodu</p> <p>4</p>	<p>četnost výskytu [-]</p>  <p>0 255</p> <p>hodnota obraz. bodu</p> <p>5</p>	<p>četnost výskytu [-]</p>  <p>0 255</p> <p>hodnota obraz. bodu</p> <p>6</p>

Různé typy histogramů obrazu a některá důležitá pravidla

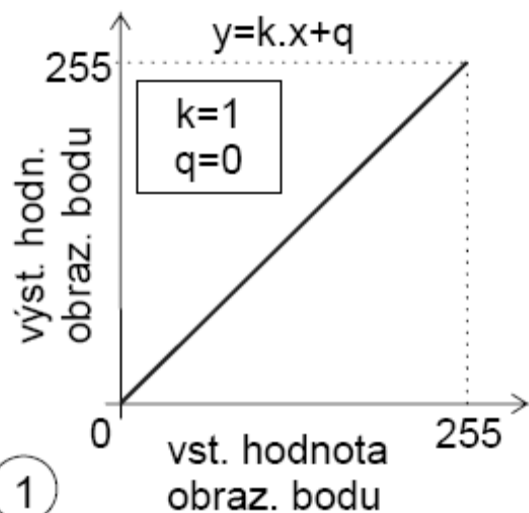
<p>Bimodální histogram</p>	<p>Ideální nereálný histogram</p>	<p>4(x) odstíny(ů) šedi v obr.</p>
 <p>četnost výskytu [-]</p> <p>0 255</p> <p>hodnota obraz. bodu</p> <p>7</p>	 <p>četnost výskytu [-]</p> <p>0 255</p> <p>hodnota obraz. bodu</p> <p>8</p>	 <p>četnost výskytu [-]</p> <p>0 255</p> <p>hodnota obraz. bodu</p> <p>9</p>
<p>Trimodální histogram</p>	<p>Pravidlo č.1 a 2</p>	<p>Pravidlo č. 3 a 4</p>
 <p>četnost výskytu [-]</p> <p>0 255</p> <p>hodnota obraz. bodu</p> <p>10</p>	<p>11</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Histogram nemá souvislost s polohou obrazového bodu v obrazu. 2. Z histogramu lze určit plochu v obrazu, která je určena daným odstínem šedi. 	<p>12</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Součet všech četností v histogramu je roven počtu obrazových bodů v obrazu. 4. Při výpočtu histogramu je vždy nutné na začátku vynulovat pole, kam se jednotlivé četnosti ukládají.

Způsob aplikace LUT

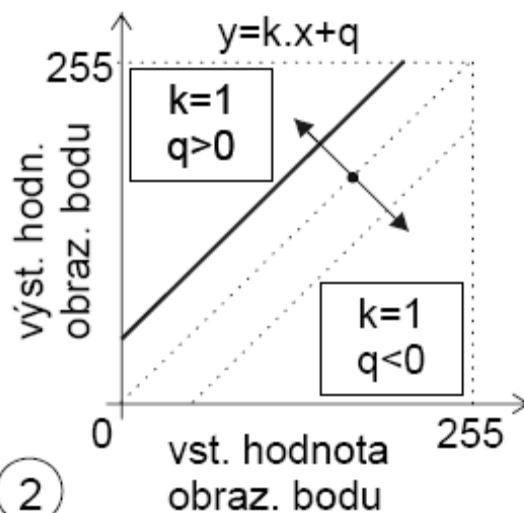


Vybrané převodní charakteristiky obrazu - bodové operace (LUT)

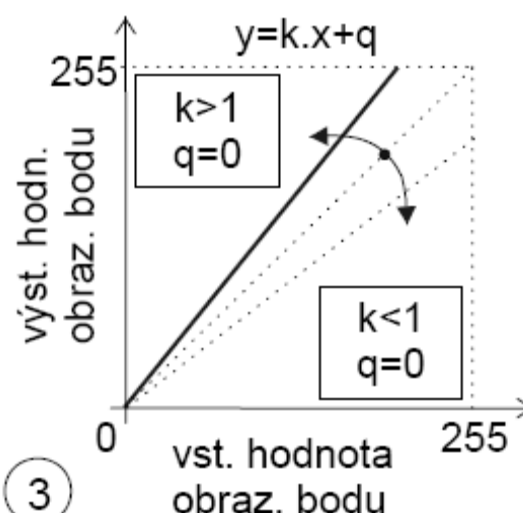
Bez úpravy obrazu (originál)



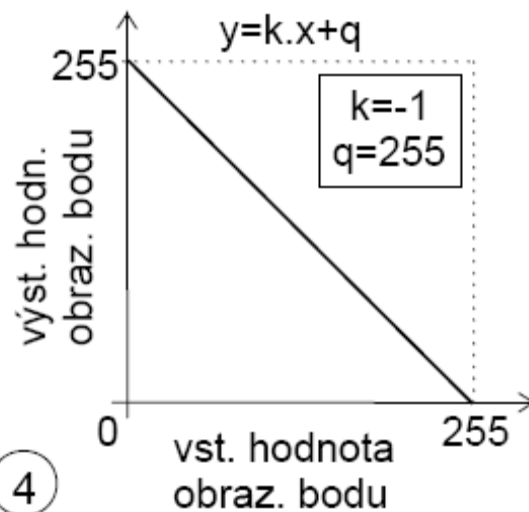
Úprava jasu



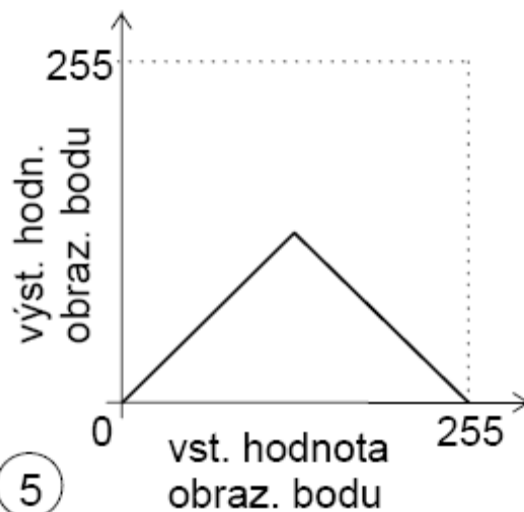
Úprava kontrastu



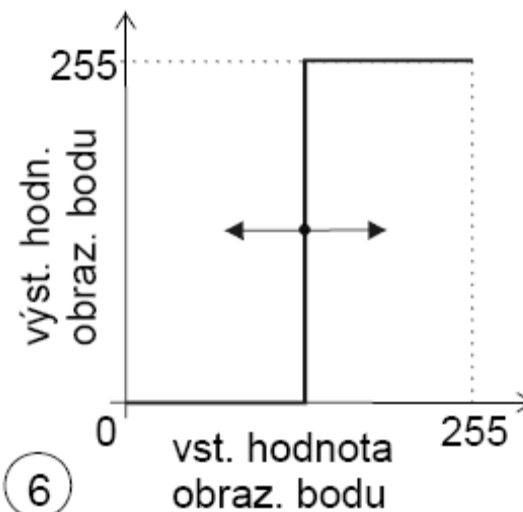
Negativ (reverzní char.)



Část originálu a negativu

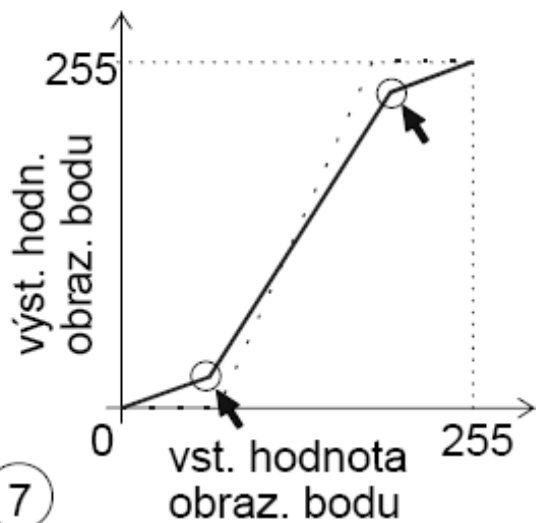


Prahování

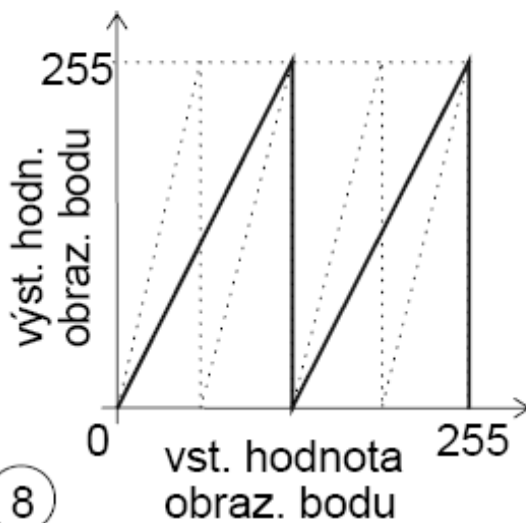


Vybrané převodní charakteristiky obrazu - bodové operace (LUT)

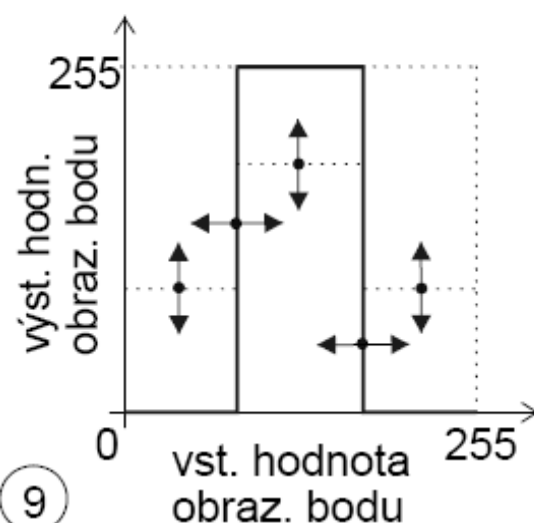
Tzv. "gumová páska"



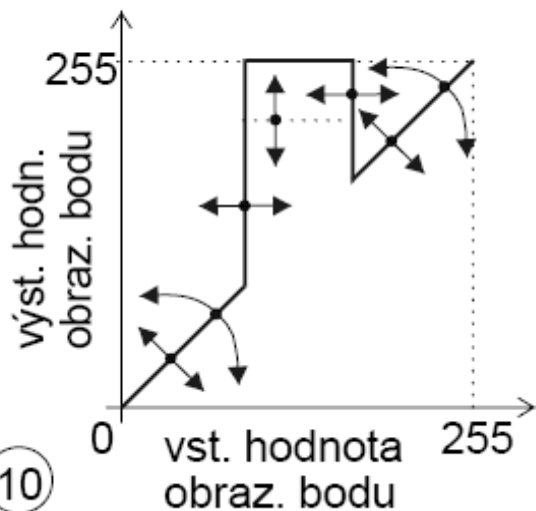
Přetečení dyn. rozsahu



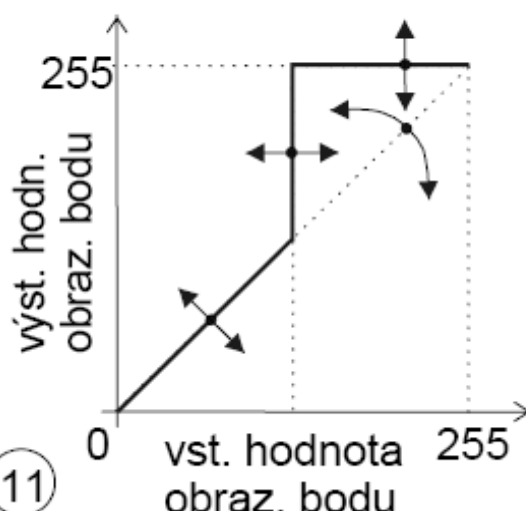
Úrovňový řez (okénko)



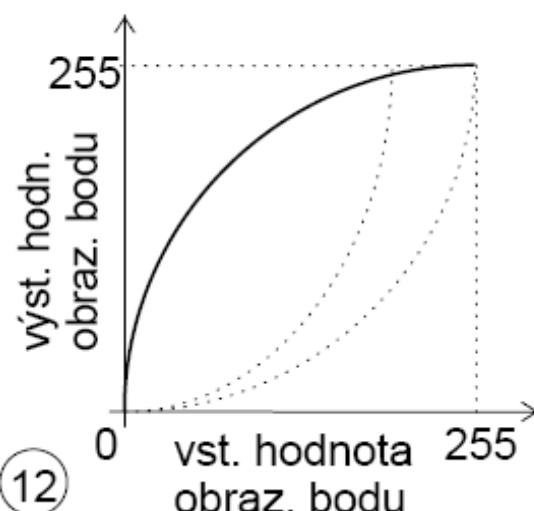
Originál a prahování



Originál a prahování

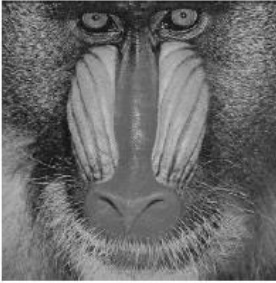
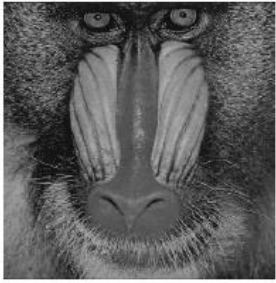


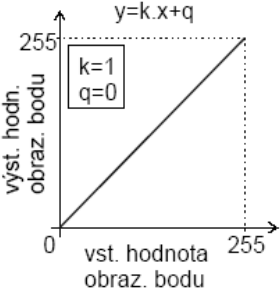
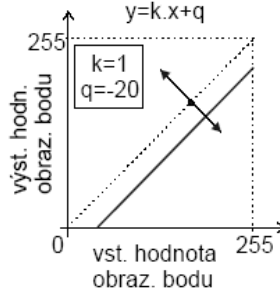
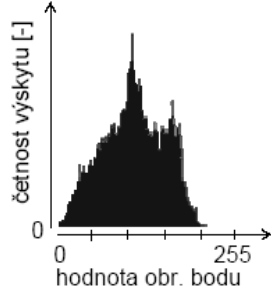
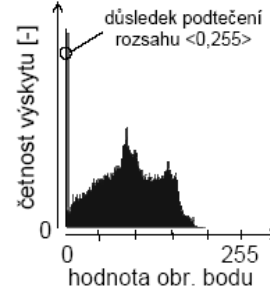
Nelineární průběh



Změna jasu

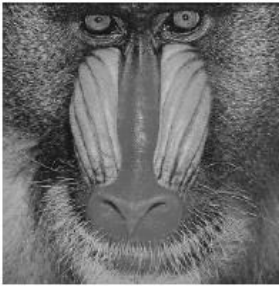
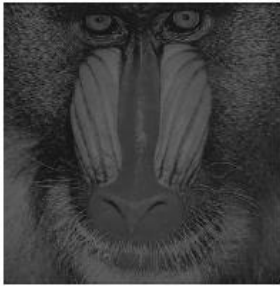
Zmenšení jasu – odečtení konstanty

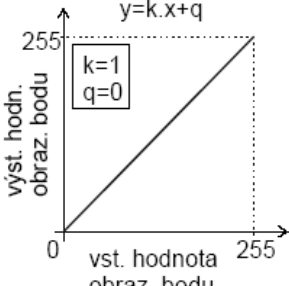
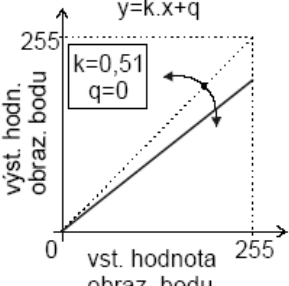
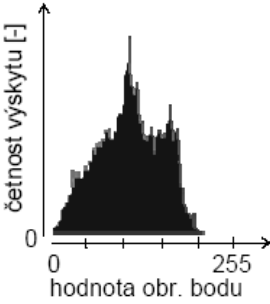
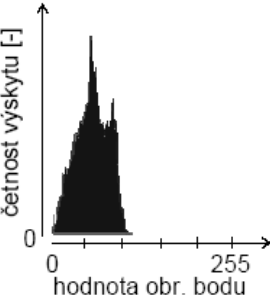
Operace ⇨	Odečtení konstanty od původního obrazu (snížení jasu)																																																			
↓ Subjekt	Stav před operací (vstup)	Stav po operaci (výstup)																																																		
Obraz																																																				
Obrazová data (jemný detail levého oka)	<table border="1"> <tr><td>56</td><td>53</td><td>48</td><td>49</td><td>101</td></tr> <tr><td>38</td><td>22</td><td>69</td><td>16</td><td>36</td></tr> <tr><td>76</td><td>84</td><td>196</td><td>27</td><td>21</td></tr> <tr><td>22</td><td>18</td><td>109</td><td>14</td><td>16</td></tr> <tr><td>74</td><td>27</td><td>14</td><td>8</td><td>22</td></tr> </table>	56	53	48	49	101	38	22	69	16	36	76	84	196	27	21	22	18	109	14	16	74	27	14	8	22	<table border="1"> <tr><td>36</td><td>33</td><td>28</td><td>29</td><td>81</td></tr> <tr><td>18</td><td>2</td><td>49</td><td>0</td><td>16</td></tr> <tr><td>56</td><td>64</td><td>176</td><td>7</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>89</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>54</td><td>7</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td></tr> </table>	36	33	28	29	81	18	2	49	0	16	56	64	176	7	1	2	0	89	0	0	54	7	0	0	2
56	53	48	49	101																																																
38	22	69	16	36																																																
76	84	196	27	21																																																
22	18	109	14	16																																																
74	27	14	8	22																																																
36	33	28	29	81																																																
18	2	49	0	16																																																
56	64	176	7	1																																																
2	0	89	0	0																																																
54	7	0	0	2																																																

Operace ⇨	Odečtení konstanty od původního obrazu (snížení jasu)	
↓ Subjekt	Stav před operací (vstup)	Stav po operaci (výstup)
Převodní charakteristika		
Histogram		

Změna kontrastu

Snížení kontrastu – dělení konstantou

Operace ⇨	Dělení původního obrazu konstantou (snížení kontrastu)																																																			
↓ Subjekt	Stav před operací (vstup)	Stav po operaci (výstup)																																																		
Obraz																																																				
Obrazová data (jemný detail levého oka)	<table border="1"> <tr><td>56</td><td>53</td><td>48</td><td>49</td><td>101</td></tr> <tr><td>38</td><td>22</td><td>69</td><td>16</td><td>36</td></tr> <tr><td>76</td><td>84</td><td>196</td><td>27</td><td>21</td></tr> <tr><td>22</td><td>18</td><td>109</td><td>14</td><td>16</td></tr> <tr><td>74</td><td>27</td><td>14</td><td>8</td><td>22</td></tr> </table>	56	53	48	49	101	38	22	69	16	36	76	84	196	27	21	22	18	109	14	16	74	27	14	8	22	<table border="1"> <tr><td>29</td><td>27</td><td>25</td><td>25</td><td>52</td></tr> <tr><td>19</td><td>11</td><td>35</td><td>8</td><td>18</td></tr> <tr><td>39</td><td>43</td><td>101</td><td>14</td><td>11</td></tr> <tr><td>11</td><td>9</td><td>56</td><td>7</td><td>8</td></tr> <tr><td>38</td><td>14</td><td>7</td><td>4</td><td>11</td></tr> </table>	29	27	25	25	52	19	11	35	8	18	39	43	101	14	11	11	9	56	7	8	38	14	7	4	11
56	53	48	49	101																																																
38	22	69	16	36																																																
76	84	196	27	21																																																
22	18	109	14	16																																																
74	27	14	8	22																																																
29	27	25	25	52																																																
19	11	35	8	18																																																
39	43	101	14	11																																																
11	9	56	7	8																																																
38	14	7	4	11																																																

Operace ⇨	Dělení původního obrazu konstantou (snížení kontrastu)	
↓ Subjekt	Stav před operací (vstup)	Stav po operaci (výstup)
Převodní charakteristika		
Histogram		

K základním metodám radiometrického zvýraznění patří:

- **prahování** – vytvoří se „bitový obraz“ 0 – 1 vhodný např. k maskování,
- **hustotní řezy** – redukování počtu hodnot pixelů do několika definovaných tříd (řezů),
- **zvýraznění kontrastu**, které spočívá v úpravě histogramu
 - jeho **lineárním roztažením** (stretching) v celém využitém rozsahu nebo v některé jeho části,
 - **vyrovnáním (equalizace)** – čtenějším hodnotám se přisoudí větší prostor nebo
 - **zvýrazněním určité části histogramu.**
- Histogram lze upravit podle jakékoliv jiné LUT – např. podle senzitometrické křivky apod.
- Zlepšení kontrastu lze dosáhnout také tzv. **saturací** (potlačení), tj. odstraněním části histogramů s podprahovými četnostmi pixelů blízkých např. 0, resp. 255 (2,5 %, 5 % apod.).

Prahování (1/3)

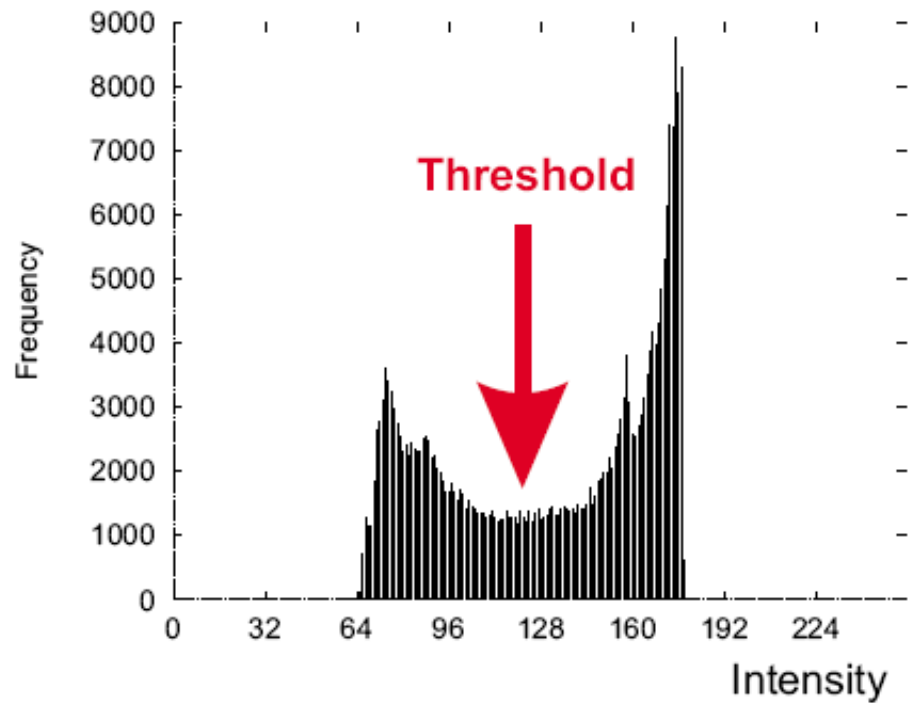
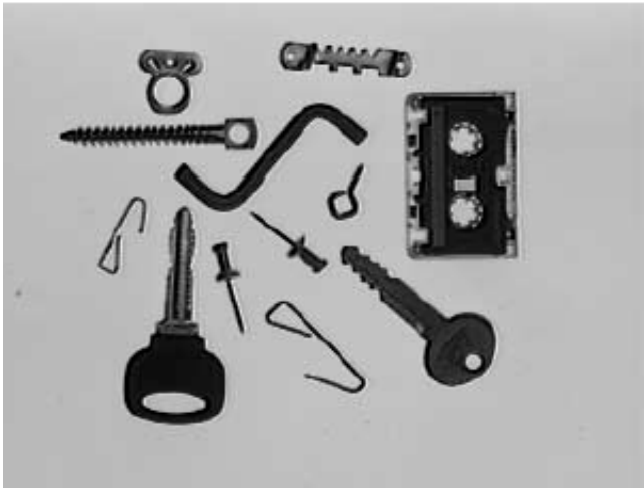
- **Prahování** (anglicky *thresholding*) je funkce, která upravuje jasové či barevné složky pixelů obrazu podle předpisu:

$$f(c) = \begin{cases} A & \text{pokud } c < \text{práh} \\ B & \text{pokud } c \geq \text{práh} \end{cases}$$

kde c je vstupní hodnota jasu nebo barvy, $f(c)$ je výsledná hodnota, práh je prahovací hodnota, A a B jsou nové hodnoty pro vstupní hodnotu c pod a nad prahem.

- Hodnotu prahu lze určit například z barevného a jasového histogramu obrázku.

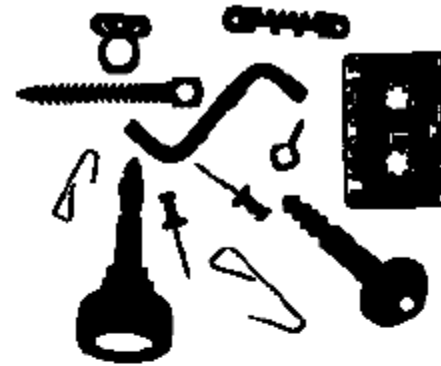
Prahování (2/3)



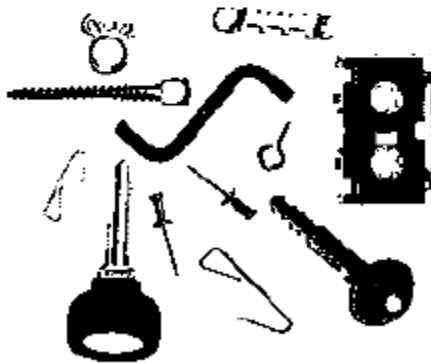
Aplikace prahování (3/3)



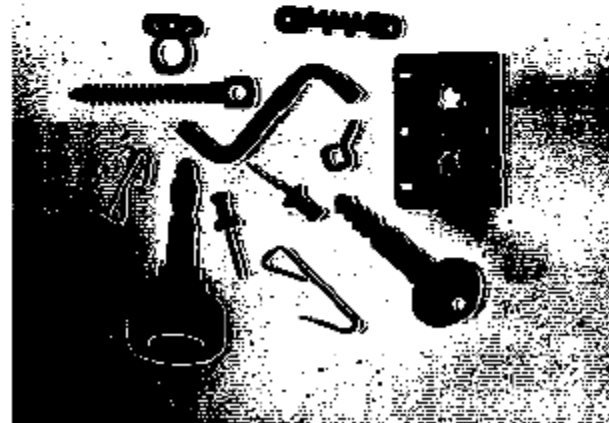
Original image.



Properly set threshold.

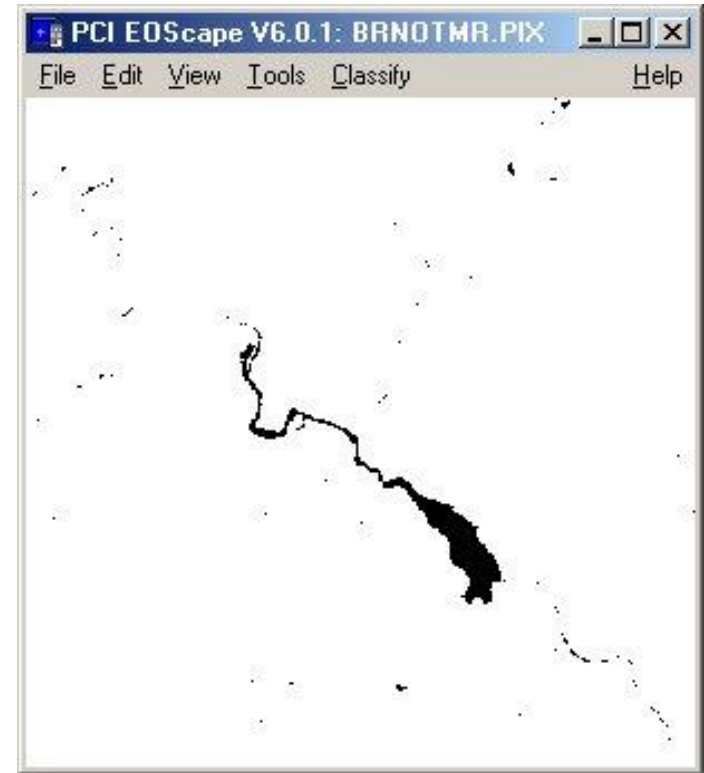
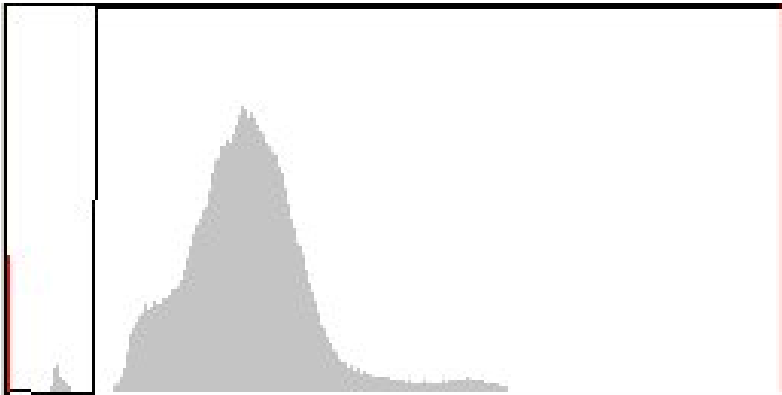


Threshold too low.



Threshold too high.

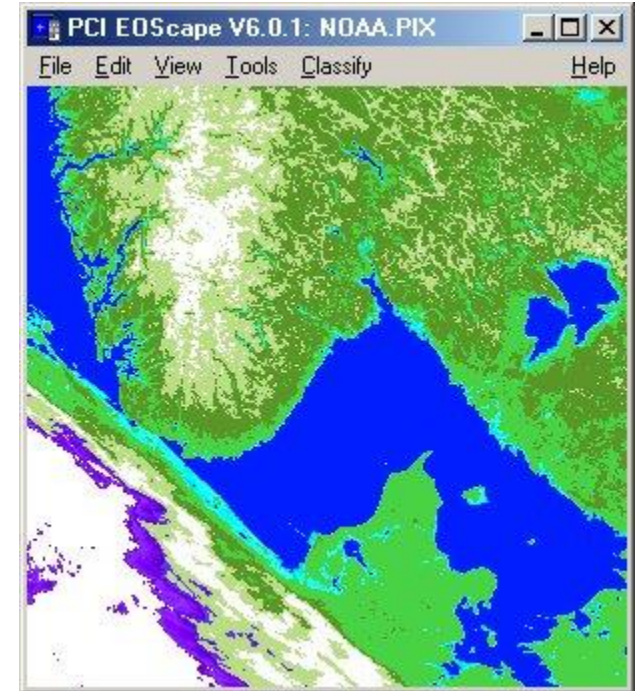
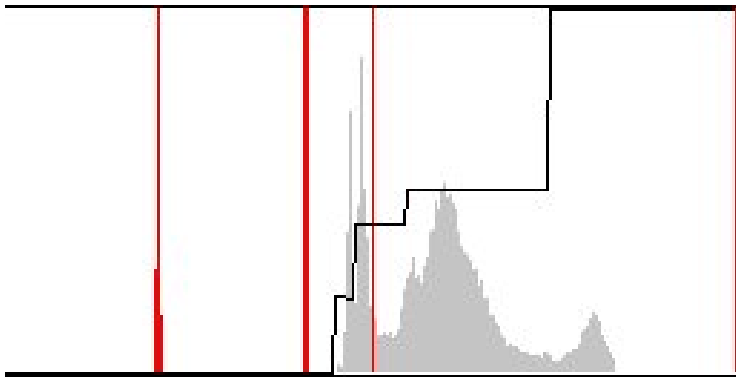
Příklad aplikace prahování



Dvouvrcholový histogram snímku LANDSAT TM4 (vlevo) tvoří pixely představující vodní plochy (levý vrchol) a souše (pravý vrchol). Lokální minimum, kterým je vedena funkce LUT (práh) určuje hodnotu přechodu mezi pixely představujícími vodu a souši. Obrázek vpravo je výsledek aplikace prahování.

Převzato z: https://is.muni.cz/www/680/7404989/dpz_dzo/dzo_cvic_05.html

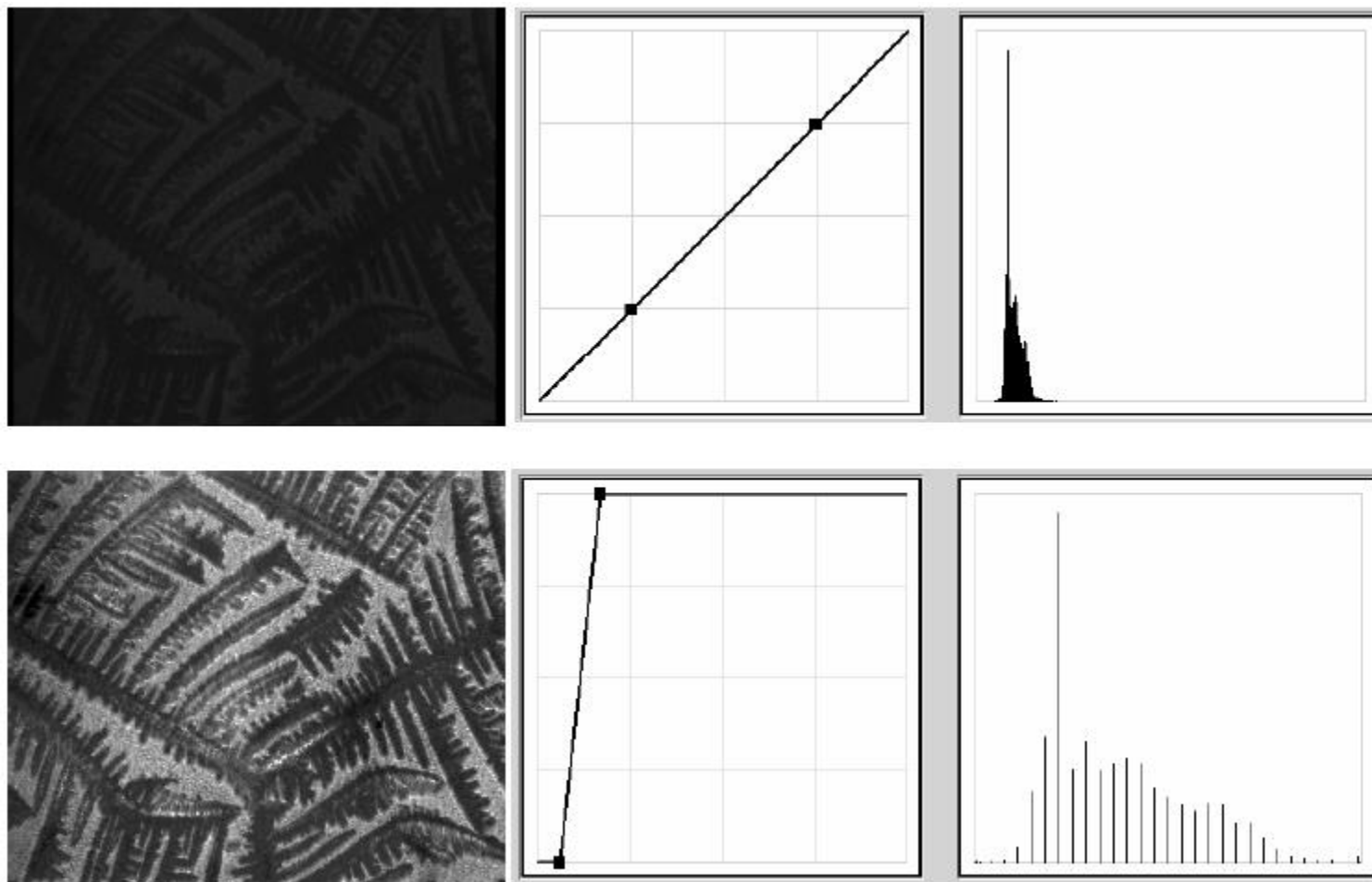
Příklad aplikace hustotních řezů



Obrázek vlevo ukazuje vícevrcholový histogram infračerveného pásma vytvořeného skenerem AVHRR na družici NOAA. Jednotlivými lokálními minimy jsou vedeny prahové hodnoty, které představují změnu druhu povrchu. Každému ze základních druhů povrchů na snímku vpravo byla přiřazena jedna barva v režimu počítače.

Převzato z: https://is.muni.cz/www/680/7404989/dpz_dzo/dzo_cvic_05.htm

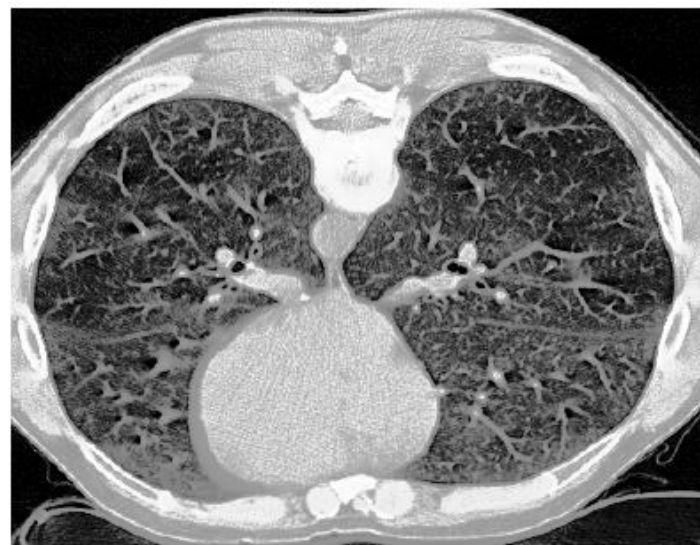
Roztažení histogramu (Histogram Stretching)



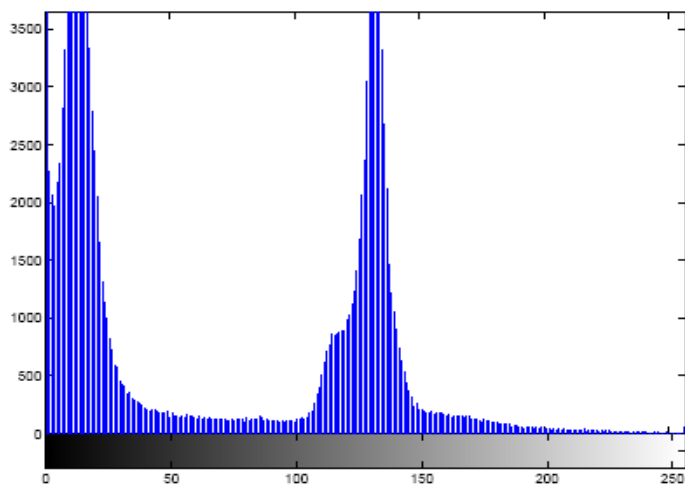
Vyrovnání histogramu (Histogram Equalization)



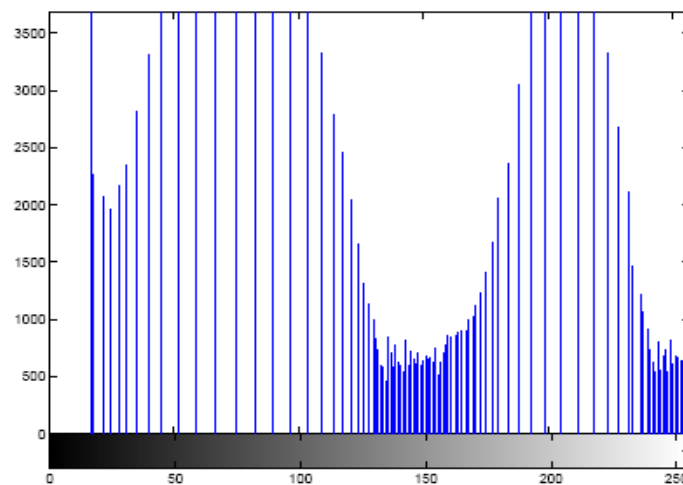
původní obraz



zvýšení kontrastu



histogram původního obrazu



histogram po ekvalizaci

Příklady postprocesingových metod (1/2)

- ...přidání šumu,
- průměrování,
- práce s mediánem
- aj.



Originál 256×256



Přidán umělý šum



Průměrování 3×3



Průměrování 7×7

Příklady postprocesingových metod (2/2)



Originál 256×256



Přidán umělý šum



Medián 3×3

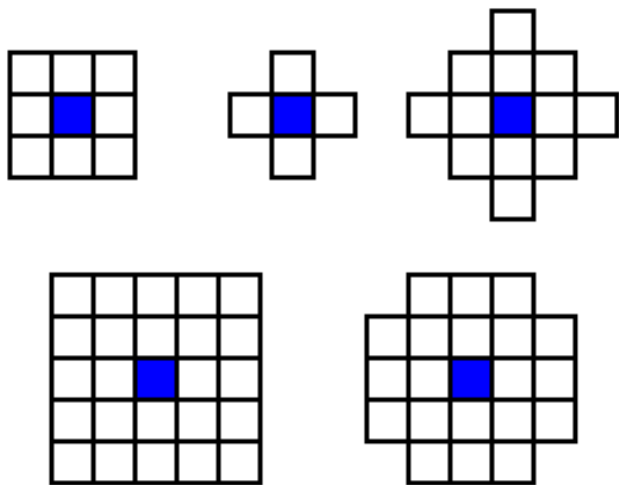
Hodnota původního pixelu je nahrazena mediánovou hodnotou jeho okolí.

$$\begin{bmatrix} 10 & 0 & 89 \\ 255 & 56 & 131 \\ 0 & 178 & 255 \end{bmatrix} \rightarrow [0 \ 0 \ 10 \ 56 \ 89 \ 131 \ 178 \ 255 \ 255]$$

↑
MEDIÁN

Prostorové zvýraznění (filtrace)

- Při **prostorovém zvýraznění (filtraci)** se určuje nová hodnota DN určitého pixelu v závislosti na hodnotách určitého počtu okolních pixelů (problém: neztratit liniové prvky!).
- Filtrace je spojena s pojmem prostorová frekvence a s použitím široké škály různě definovaných filtrů a filtračních metod.

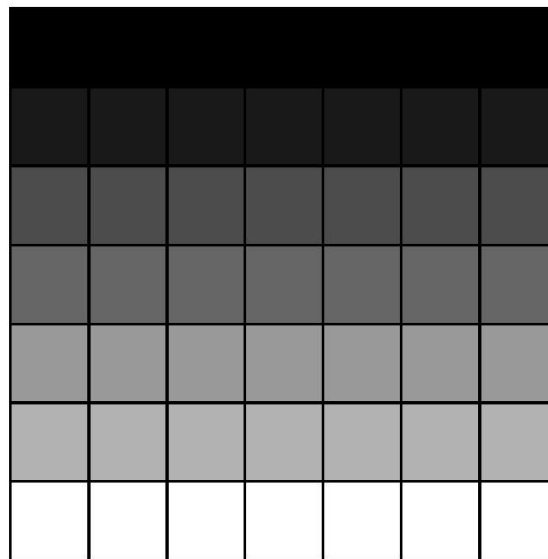
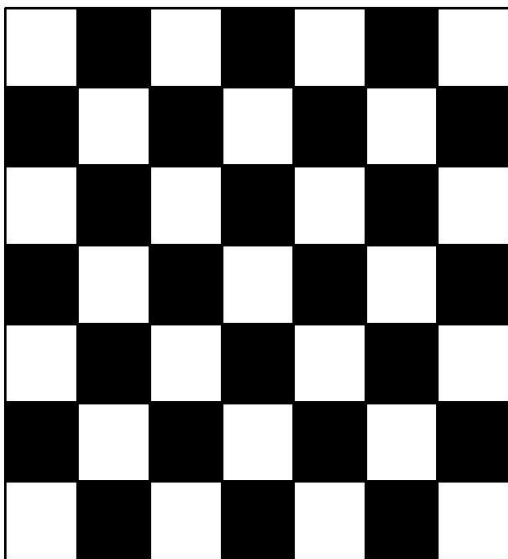


Příklady možných filtrovacích oken (lze nastavit i filtrovací okna nesymetrická!).

Prostorové zvýraznění (filtrace)

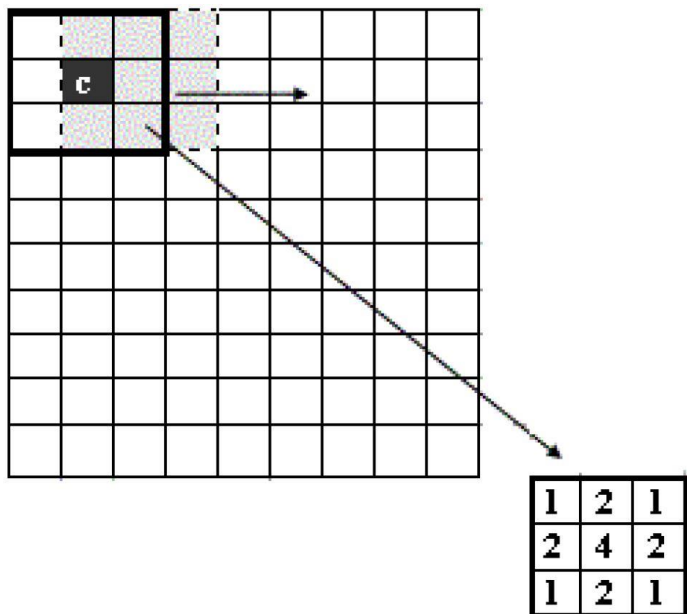
Filtry mají buď:

- nízkou propustnost (low pass) - ztrácí se liniové prvky,
- vysokou propustnost (high pass) - ostríčí filtry (sharpening) a hranové operáty.



*Příklady
vysokofrekvenční
(vlevo) a
nízkofrekvenční
informace (vpravo) v
obraze.*

Princip filtrace obrazu



- Je definováno tzv. **filtrovací okno**. Je představováno obvykle čtvercovou maticí o lichém počtu řádků a sloupců (např. 3 x 3; 5 x 5 atd., ale může tomu být i jinak viz předcházející snímek). Každý pixel tohoto okna obsahuje koeficient – **váhu**.
- Filtrovaný obraz je pak generován násobením každého koeficientu v okně hodnotou pixelu z originálního snímku podle současné polohy okna.
- Výsledek je přiřazen centrálnímu pixelu ve filtrovaném snímku.
- Okno se posouvá po snímku po jednom pixelu pohybem, který bývá označován jako „konvoluce“.
- Okrajové pixely po obvodu snímku, aby mohly být centrálním pixelem okna, jsou v průběhu filtrovací operace replikovány nebo je výsledný filtrovaný snímek zmenšen o polovinu šířky filtrovacího okna minus 1 na každé straně.

Nízkofrekvenční filtry

Nízkofrekvenční filtry propouštějí pouze nízkofrekvenční informaci a produkují tak obrazy, které jsou oproti původním tzv. „shlazené“ obdobně, jako jsou shlazovány např. časové řady tzv. klouzavými průměry.

Často se používají filtry:

- **průměrové** (běžné, vážené – nepočítám-li hodnotu prostředního pixelu, mohu si pomoci při odstraňování bitových chyb),
- **mediální**,
- **majoritní** (např. modální),
- **sít'ové** (siev filtr) – odstraňují z obrazu plochy, které jsou menší než zadaná prahová hodnota (připojují se tak k sousedním větším plochám),
- **průměrové s rotujícím oknem** – okolí filtrovaného obrazového prvku se porovnává se čtyřmi předem definovanými vzorovými filtrovacími okny (jsou už na bázi vysokofrekvenčních, tj. jejich součet je 0). Vzorové okolí s minimální výslednou hodnotou se použije jako průměrového filtru (při filtrování se zachovávají linie).

Vysokofrekvenční filtry

Vysokofrekvenční filtry slouží především pro detekci hran (má nulovou šířku) a linií. Hrana, resp. linie může být:

- **střechová** (linie na tmavém pozadí – např. cesta),
- **příkopová** (linie na světlém pozadí – např. řeka),
- **stupňová** (přechod mezi světlým a tmavým objektem – např. mezi lesem a polem).

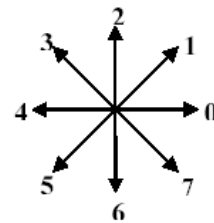
Často se používají:

- laplaceovské filtry (váha středového pixelu je rovna záporně vzatému součtu vah okolních pixelů, suma všech je tedy rovna nule). Udávají pouze velikost hrany, ale ne její směr. Chceme-li znát i směr hrany, použijeme směrově závislý gradientní operátor,
- směrově závislé gradientní operátory, což jsou filtry zdůrazňující hrany nebo linie jen určitého směru (např. Sobelův, Prewittův aj.), průměr z diferencí ve filtrovacím okně se dosadí za středový pixel. Je-li oblast homogenní jsou difference nulové, jsou-li nenulové, pak je indikována možnost hrany.

laplaceovský filtr

$$h = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Prewittovy a Sobelovy filtry



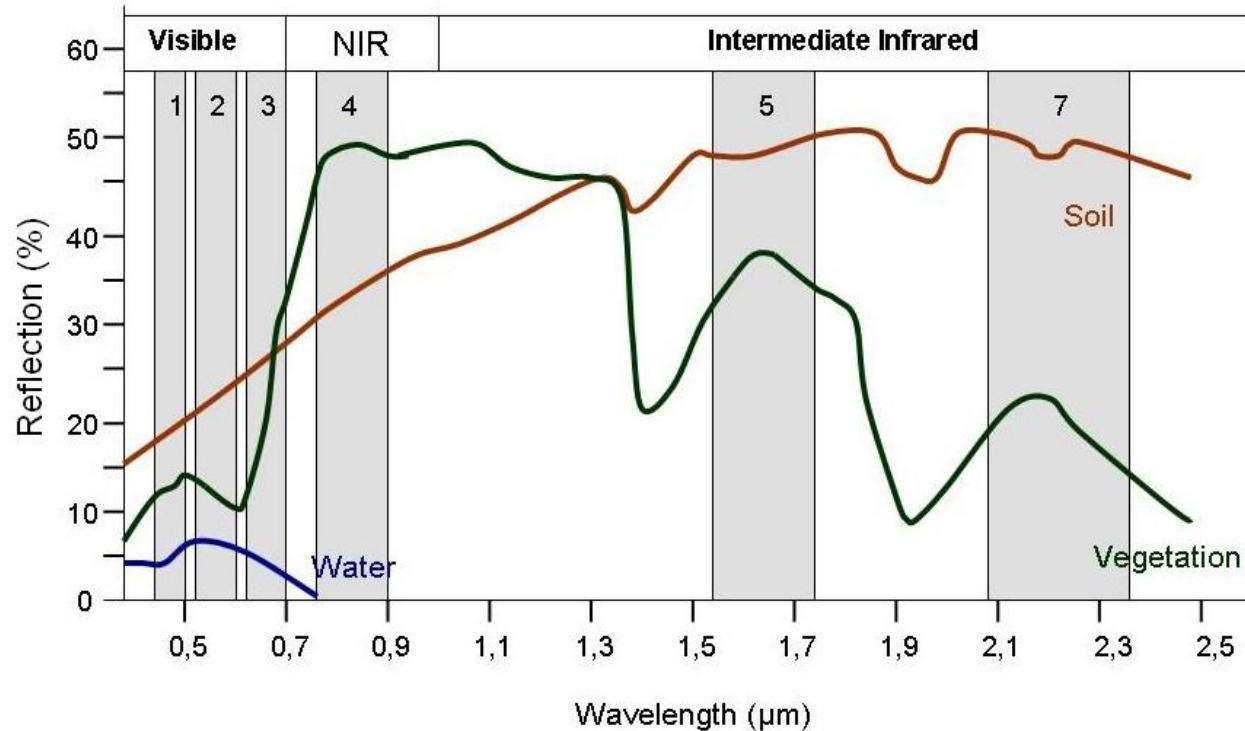
◇ *Prewitt*

$$\begin{aligned} h_0 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} & h_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} & h_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} & h_3 &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\ h_4 &= \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} & h_5 &= \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} & h_6 &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} & h_7 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

◇ *Sobel*

$$\begin{aligned} h_0 &= \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} & h_1 &= \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -2 \end{bmatrix} & h_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} & h_3 &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\ h_4 &= \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} & h_5 &= \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} & h_6 &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} & h_7 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

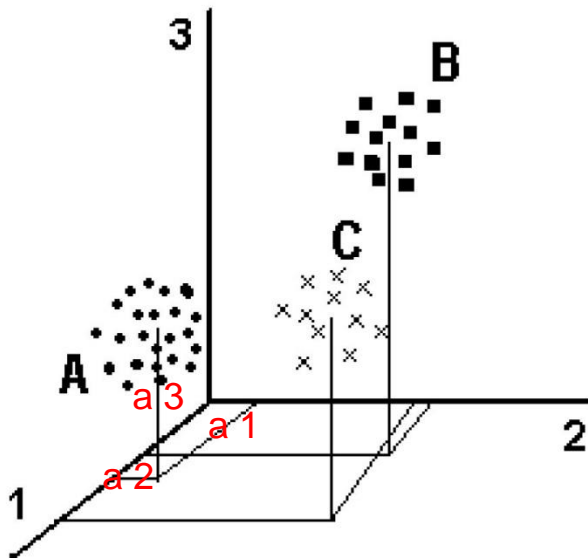
Spektrální zvýraznění



Multispektrální snímky jsou pořizovány ve vybraných částech elektromagnetického spektra (zde 7). Každý objekt se na jednotlivých snímcích projeví různými typickými hodnotami DN (spektrálními příznaky), přičemž na konkrétních snímcích jsou hodnoty DN daného objektu ze statistického hlediska více či méně blízké (ve vícerozměrném prostoru vytvářejí typické shluky/clustery).

Spektrální zvýraznění

Jednotlivá pásma, v nichž jsou pořizovány multispektrální snímky, využijeme pro konstrukci vícerozměrného příznakového prostoru (podle předcházejícího snímku 7-rozměrného, příklad vlevo 3-rozměrného, korelogramy v následující prezentaci prezentují dvojrozměrné příznakové prostory).



Poloha daného objektu v tomto prostoru je pak dána jeho spektrálními vlastnostmi v jednotlivých spektrálních pásmech (na příkladu vlevo: objekt A má v 1. pásmu hodnoty blízké a_1 , ve 2. pásmu blízké a_2 a ve 3. pásmu blízké a_3).

Definování příznakového prostoru (počet a volba konkrétních spektrálních pásem/kanálů) jsou důležitým krokem při automatickém rozpoznávání objektů na snímcích.

Spektrální zvýraznění

- Má-li mít barevná syntéza multispektrálních snímků dostatečnou vypovídací schopnost, pak musí být vytvořena z pásem (multispektrálních snímků), které dávají (objektivně) vzájemně nejvíce odlišné informace (jsou mezi sebou co nejméně korelovány). K vyhledávání takových pásem se užívá OIF.
- Optimum index factor (OIF):

$$OIF = \frac{\sum_{k=1}^n S_k}{\sum_{j=1}^n Abs(r_j)}$$

S_k - směrodatná odchylka pro pásmo k (z celkového počtu n pásem)

r_i - hodnota korelačního koeficientu mezi libovolnými dvěma pásmy v dané kompozici.

- Kompozice s nejvyšší hodnotou OIF bude z informačního hlediska optimální.

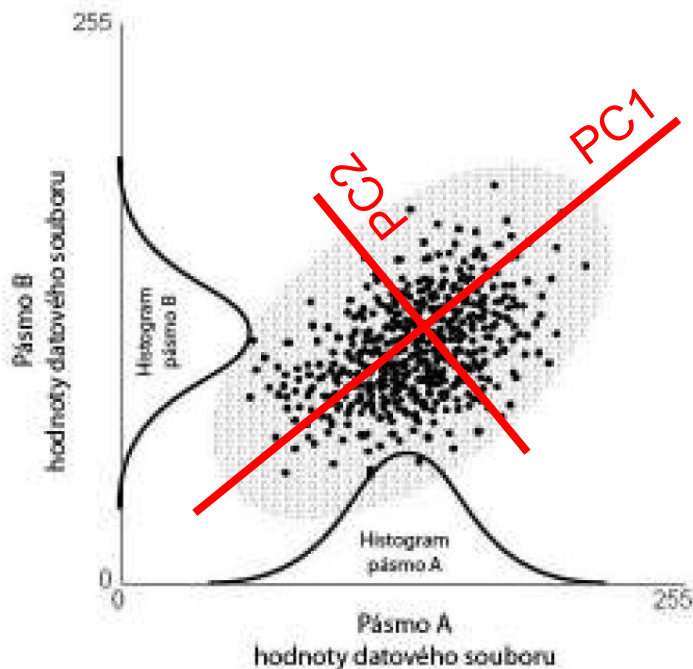
Metoda hlavních komponent

- Metoda hlavních komponent (PCA, *Principal Component Analysis*) se používá jako prostředek zvýraznění obrazu k vizuální interpretaci i jako metoda zvýraznění obrazu před jeho automatickou klasifikací.
- PCA je statistická metoda, která rotuje osami vícerozměrného prostoru tvořícího multispektrální snímek, a to ve směru maximálního rozptylu dat.
- Analýzou hlavních komponent lze další zpracování omezit na méně pásem bez podstatné ztráty informace - redukuje tedy rozměrnost (dimensionalitu) zpracování.

Metoda hlavních komponent

Za předpokladu normálního rozdělení se zobrazují jednotlivá spektrální pásma v n-rozměrném prostoru jako elipsa (2 rozměry), elipsoid (3 rozměry) či jako hyperboloid (více než 3 rozměry).

Následně se vytvoří souřadnicový systém (příklad pro rovinu), jehož první osa bude orientovaná ve směru maximálního rozptylu původních dat (shodně s hlavní osou elipsy). Takto určená osa, neboli hlavní komponenta (PC1) definuje pásmo nového transformovaného obrazu. V místě druhého největšího rozptylu původních dat (shodně s vedlejší osou elipsy) se kolmo na PC1 vede kolmá osa, tzv. druhá hlavní komponenta (PC2), která obsahuje menší množství informací z původních pásem, ale takových, které nejsou popsány v předcházející komponentě. Obdobným způsobem lze pokračovat dále. Další komponenty vždy procházejí nejširším místem „prostorového tělesa“ a jsou kolmé na komponenty předcházející nižší úrovně.



Použití barevných modelů

- Každý barevný obraz může být také popsán a upravován v rámci možností datových modelů (RGB, CMY, IHS aj.).
- Zvýšení informační hodnoty barevného obrazu může napomoci i vzájemná transformace barevných modelů v jednotlivých spektrálních pásmech multispektrálního obrazu apod.

Použití aritmetických operací

Obrazové podíly:

Vedou k potlačení vlivů topografie (různé hodnoty DN v důsledku různě osvětlených svahů).

- Obecně se konstruuují tak, že v čitateli je pásmo, ve kterém zvýrazňovaný povrch intenzivně odráží a ve jmenovateli naopak pásmo, ve kterém povrch pohlcuje.

Příklady (pro Landsat):

- TM4/TM3 – vegetační index
- TM3/TM1 – zvýrazňuje výskyt půd s oxidy železa
- TM5/TM7 – zvýrazňuje místa s výskytem jílových minerálů

Rozdíl obrazů:

Jednoduchá metoda stanovení změn mezi dvěma časovými horizonty.

- Nulový výsledek indikuje žádnou změnu, nenulové hodnoty indikují určité změny.
- Znaménko výsledku určuje směr změny.
- Operaci odčítání lze aplikovat na původní pásma i na výsledky klasifikace.

Použití aritmetických operací

Násobení obrazů:

Technika pro maskování vybraných ploch na snímku.

- Zájmová plocha má hodnotu pixelů 1, ostatní plochy hodnotu 0.
- Když je touto „maskou“ vynásoben jiný obraz, dostaneme ve výsledku pouze zájmovou plochu, ostatní plochy mají nulové hodnoty.
- Pokud dva povrchy mají podobné hodnoty odrazivosti ve dvou pásmech lze jejich roznásobením zvýšit mezi nimi kontrast.

Součet obrazů:

- Přičtení výsledku vysokofrekvenční filtrace k původnímu obrazu (ostríací filtr).
- Součet snímků jako celková míra vhodnosti (tzv. mapová algebra).

Pozn.: Mapová algebra je analogií maticového počtu a rastr je analogií matice.

Zvýraznění textury

- Filtrace je dobře použitelné i pro objektivizaci tak nehomogenního interpretačního znaku, jakým je **textura**. (míra uspořádanosti nebo celistvosti povrchových objektů).
- Filtry jsou založeny na výpočtu různých statistických měr homogenity či naopak variability hodnot pixelů ve filtrovacím okně.
- Textura může být charakterizovaná rozptylem hodnot, variačním koeficientem, koeficientem šikmosti či špičatosti, entropií apod.

Zvýraznění textury

- Většina měř textury je založena na GLCM (Grey Level Cooccurrence Matrix), což je čtvercová matice, která vyjadřuje, jak často se určité kombinace DN hodnot pixelů v obraze vyskytují.
- Z GLCM lze vypočítat popisné charakteristiky textury, které lze následně využít např. jako vstupu do klasifikace.



0	0	1	1
0	0	1	1
0	2	2	2
2	2	3	3

	0	1	2	3
0	2	2	1	0
1	0	2	0	0
2	0	0	3	1
3	0	0	0	1

Literatura a použité zdroje

- Dobrovolný Petr: *Dálkový průzkum Země: digitální zpracování obrazu. 1. vydání. Brno MU, 1998*
- Kolář, J., Halounová, L., Pavelka, K.: *Dálkový průzkum Země 10. Vydavatelství ČVUT, Praha 1997, 164 s., ISBN 80-01-01567-X*
- Pavelka, K.: *Zpracování obrazových záznamů DPZ. 1. vydání. Praha, ČVUT, 1999*
- Hebák Petr, Hustopecký Jiří, Jarošová Eva, Pecáková Iva: *Vícerozměrné statistické metody I. 2. vyd., Informatorium, 2007, ISBN 80-7333-025-3*
- Mudrová M., Procházka A.: *Principal Component Analysis in Image Processing. Proc. of Int. Conf. Technical Computing 2005, 15.11.2005, Prague, str. MUD/1-MUD/4, Humusoft Praha, 2005, ISBN 80-7080-577*
- <http://geography.middlebury.edu/data/gg1002/Readings/Week2/AirphotoInterpretation.pdf>
- https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1999journal/sep/1999_sept_1041-1049.pdf
- <https://www.slideshare.net/pramodgpramod/image-interpretation-keys-image-resolution>
- aj.