

ČÁST I. DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ

1. Úvod

1.1 Definice dálkového průzkumu Země a jeho význam

V nejobecnějším smyslu slova **dálkový průzkum** (angl. Remote Sensing, fr. Teledetection, něm. Fernerkundung) znamená získávání informací o objektech a jevech na dálku - bez přímého kontaktu s těmito jevy či objekty, při kterém se využívá dvou základních poznatků:

- člověk, ať již sám či za pomoci různě složitých přístrojů, je schopen získávat kvalitativní i kvantitativní informace o jevech a věcech, které ho obklopují
- každý tento jev nebo objekt nějakým charakteristickým způsobem ovlivňuje své okolí.

Řada autorů uvádí více či méně vyčerpávající definici tohoto pojmu. Zájemce lze odkázat především na práci ALFÖLDIHO et al. (1993) nebo CAMPBELLA (1996). Množství konvenčních i značně nekonvenčních definic lze nalézt také na webovských stránkách kanadského střediska pro dálkový průzkum Země CCRS (<http://www.ccrs.rncan.gc.ca/ccrs/eduref>). Vymezením pojmu dálkový průzkum se u nás zabýval například ČAPEK (1988). Některé definice jsou uvedeny dále.

Dálkový průzkum je věda i umění získávat užitečné informace o objektech, plochách či jevech prostřednictvím dat měřených na zařízení, která s těmito zkoumanými objekty, plochami či jevy nejsou v přímém kontaktu

(Lillesand, Kiefer 1994)

Dálkový průzkum je shromažďování informací o přírodních zdrojích s využitím snímků pořízených senzory umístěnými na palubách letadel nebo družic

(Bob Ryerson, CCRS)

Dálkový průzkum je skupina technik, zabývající se pořizováním snímků a jiných forem dat pořízených měřeními na dálku, zpracováním a analýzou těchto dat.

(RESORS, CCRS)

Dálkový průzkum může být definován jako shromažďování informací o objektech bez fyzického kontaktu s nimi. Letadla a družice jsou běžnými nosiči, ze kterých se tato měření na dálku provádějí. Termín dálkový průzkum je omezen na metody, které využívají elektromagnetického záření jako prostředku ke zjišťování objektů a k měření jejich charakteristik.

(Sabins 1978)

Dálkový průzkum je způsob získávání informací o zemském povrchu i vodních plochách s využitím snímků pořízených z ptačí perspektivy, využívá elektromagnetického záření v jednom nebo více intervalech spektra, toto záření je odraženo nebo emitováno ze zemského povrchu.

(Campbell 1996)

Určitou představu lze získat i z definic nekonvenčních, uváděných na výše zmíněné kanadské adrese.

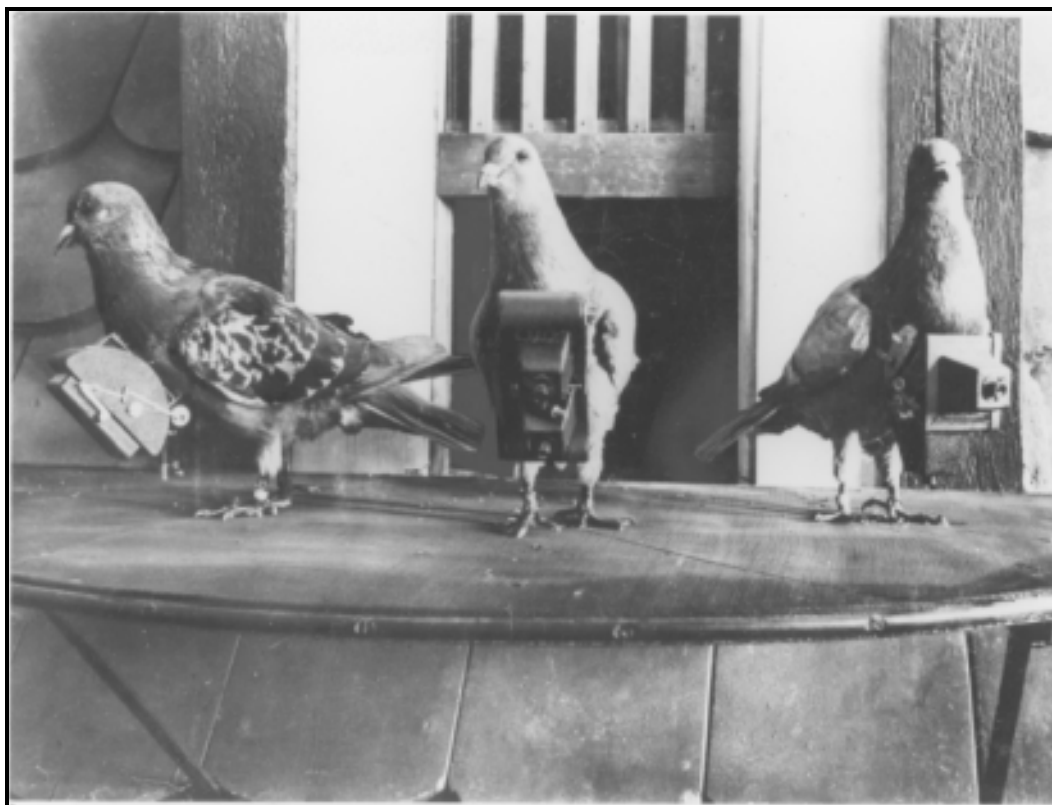
Dálkový průzkum je nejdražší způsob, jak vytvořit obrázek.

(**Andrew Bashfield, Intergraph Corporation**)

Dálkový průzkum je umění rozdělit svět na množství malých barevných čtverečků, se kterými si lze hrát na počítači s cílem odhalení jejich neuvěřitelného potenciálu.

(**Jon Huntington, CSIRO Exploration, Geoscience, Australia**)

Obecně se získáváním informací o objektech a jevech na dálku a jejich zpracováním zabývá poměrně velké množství vědních disciplín - například astronomie, geofyzika apod. V následujícím textu je tento pojem zúžen na **dálkový průzkum Země (DPZ)**. Jde tedy o zkoumání zemského povrchu (vody i souše), ale i dolních vrstev atmosféry, případně také určité vrstvy sedimentů či vrstvy vodního sloupce, ale také i o zkoumání jevů a procesů, které zde probíhají, na dálku. K tomu je využíváno jednoho nebo několika intervalů vlnových délek tzv. elektromagnetického záření. Data o uvedených objektech či jevech mohou být poskytována v obrazové (snímky) i neobrazové formě (např. graf). Zařízení zaznamenávající intenzitu elektromagnetického záření je umístěno různých typech nosičů (obr. 1), nejčastěji na letadlech nebo družicích.



Obr. 1. Chyba! Neznámý argument přepínače. Dálkový průzkum Země jako moderní informační technologie, převzato z <http://iisf.gsfc.nasa.gov/ais/IIIFS-html/LT/New/Tutorial/intro1.html>

Dálkový průzkum Země je jednou z moderních geoinformačních technologií. Je to systém, který se sestává ze dvou základních subsystémů. První tvoří výše naznačený **subsystém sběru a přenosu dat**, druhý potom **subsystém jejich analýzy**

a interpretace. Jestliže první část celého systému představuje především jeho technickou stránku, na jeho druhou část lze v užším slova smyslu nahlížet také jako na metodu zpracování prostorové informace, používanou v nejrůznějších geovědních disciplínách. Data pořízená distančním snímáním však nacházejí uplatnění i v daleko širším okruhu aplikací - zde lze zmínit tak rozdílné oblasti lidské činnosti jako například archeologický průzkum, demografické studie či prognózy úrody zemědělských plodin.

Obrazové materiály pořízené z letadla nebo družice zaznamenávají prostorovou informaci podobně jako topografická či tématická mapa a podobně, jako tyto dva druhy map, obsahují také snímky zemského povrchu **dva druhy informací**. Prvním druhem informace je informace o poloze zobrazených objektů, o jejich tvaru, velikosti, vzdálenosti od jiných objektů apod. Druhým typem informace je informace tématická - tedy například o druhu vegetace na dané ploše či o povrchu zobrazené komunikace. Mapa je rovinnou prezentací části zemského povrchu a v závislosti na použitém kartografickém zobrazení dovoluje zjišťovat například výměru zastavěných ploch ve zpracovávaném území. V závislosti na měřítku je však její obsah do určité míry generalizován. Naproti tomu snímek pořízený z letadla nebo z družice je záznamem úplným, ovšem v důsledku způsobu jeho pořízení obsahuje zkreslenou informaci o velikosti objektů či o vzdálenostech. Nelze ho tedy použít přímo jako mapy, nemá kartografické zobrazení. Uvedené zkreslení objektů však je možné odstranit a letecká fotografie či obrazový záznam z družice se tak může stát významným podkladem pro konstrukci mapy. Na DPZ v užším slova smyslu lze tedy nahlížet i jako na vědu či umění zabývající se tématickou informací - vytvořením a zpracováním obrazové informace pro účely **tématického mapování**. Geometrickými nebo také měřičskými vlastnostmi snímků se potom zabývá především **fotogrammetrie**. Je však nutné poznamenat, že jakákoliv aplikace používající materiálů DPZ využívá jak jejich geometrických vlastností, tak i tématického obsahu. Zvláště v poslední době s mohutným rozvojem výpočetní techniky se hranice mezi tématickým mapováním metodou DPZ a fotogrammetrií stále více stírají, a to především v oblasti zpracování a interpretace.

Snímky z letadel či družic mohou tedy v mnoha případech mapy vhodně nahrazovat, protože ve velmi krátkém okamžiku zachytí daleko více detailů, které se jinak musí získávat zdlouhavým terénním mapováním. Obsah mapy je vzhledem k realitě určitým způsobem generalizován a také brzy zastarává, snímek je úplným modelem krajiny, a protože lze snímky určité oblasti pořizovat relativně velmi často, dávají nám obraz i o dynamice krajiny. Je však nutno předeslat, že letecký snímek nebo obrazový záznam z družice ještě není mapou. Obsahuje řadu zkreslení, která je nutno v procesu zpracování odstranit. Navíc jde o záběr shora, pro lidské oko nezvyklý, při kterém má řada objektů na zemském povrchu specifický vzhled. Proto jsou důležitými součástmi dálkového průzkumu Země také zpracování a interpretace snímků a obrazových záznamů.

V neposlední řadě je další předností metod dálkového průzkumu Země to, že poskytují informace o množství jevů a procesů, které jsou pouhým okem v krajině nezjistitelné, například o zdravotní kondici vegetačního krytu nebo o fyzikálních procesech v atmosféře. Pomocí některých snímků lze zjišťovat na velkých plochách i kvantitativní charakteristiky, které lze jinak měřit pouze bodově. Sem patří například zjišťování teploty objektů. Snímky mohou dávat informaci o velkoplošných jevech, které jsou jinak nezachytitelné (oblačné systémy).

V současné době můžeme DPZ podle charakteru sběru dat rozdělit na dvě části. Jednak klasickou metodu, konvenční, kdy data jsou získávána fotografickým snímáním

a interpretována v **analogové formě**, a jednak na metodu nekonvenční, kdy data jsou zaznamenávána v číselné - **digitální formě** a vyhodnocována za pomoci výpočetní techniky. Obě metody se však především v interpretační části prolínají a i přes dynamicky se rozvíjející automatické zpracování digitálních dat, je role člověka v interpretačním procesu často nezastupitelná.

1.2 Rozdělení metod DPZ a přehled obrazových materiálů

Obrazové materiály zhotovené metodami DPZ lze rozdělit podle několika hledisek - podle fyzikální podstaty snímkování, podle nosičů na kterých vznikly, podle účelu snímkování atd.

Dálkový průzkum může poskytovat data ve dvou základních formách. Jednak ve formě obrazové - tedy jako snímek určité oblasti, jednak ve formě neobrazové. Tímto může být například graf sestavený z měření tzv. profilovým radiometrem (viz. dále), zachycujícím např. množství odraženého záření podél určitého profilu daného dráhou letu nosiče. V následujícím textu půjde především o způsoby pořizování a zpracování dat obrazových. V současné době existují dva základní způsoby, kterými lze snímky pořídit.

Tzv. klasickými (**konvenčními**) metodami vznikají snímky fotografické - **fotografie** (např. v angličtině photography). Fotografie určitého území vzniká tzv. centrální projekcí pomocí objektivů na citlivých fotografických vrstvách. Obraz na celé ploše vznikne najednou v době expozice. Metodika pořizování fotografie, jejího zpracování i následné interpretace v současnosti je značně propracována. K hlavním přednostem fotografie patří především možnost zachytit značný detail, mnohdy i objekty pouhým okem nepostřehnutelné. Lze je však pořídit pouze v úzkém intervalu vlnových délek a nejčastěji jsou poskytovány v analogové formě - vykopírovány na fotografický papír. K fotografickému snímkování pro účely DPZ je využíváno především letadel, i když v minulosti i současnosti byly řada fotografií zemského povrchu pořízena i z družic, modelů letadel, balónů apod. Příkladem mohou být fotografie z amerických raketoplánů. Jejich archiv lze nalézt například v americké kosmické agentuře NASA na adrese <http://shuttle.nasa.gov> a nebo <http://ersaf.jsc.nasa.gov>. Druhou nespornou předností fotografických produktů je možnost jejich využití ve fotogrammetrii, především ke konstrukci přesných topografických map velkých měřítek, k sestavování digitálního modelu terénu atd. Klasickému leteckému snímkování, zpracování a vyhodnocování leteckých snímků je věnována i u nás celá řada prací. Za všechny lze zmínit například práce MURDYCHA (1976), JEŘÁBKA (1982) nebo ČAPKA (1988). Fotogrammetrií, tedy měřičskými vlastnostmi snímků se zabývá práce ŠMIDRKALA (1982). Také v zahraniční literatuře lze o leteckém snímkování, interpretaci letecké fotografie a základech fotogrammetrie nalézt celou řadu prací. Za všechny lze jmenovat práce autorů WOLFA (1983), SABINSE (1986), LILLESANDA a KIEFERA (1994) nebo publikace Americké společnosti pro fotogrammetrii (viz. seznam literatury).

V případě druhé skupiny metod - **nekonvenčních** - vznikají snímky postupně tzv. řádkováním za pomoci přístrojů na měření radiace - radiometrů a tzv. snímacích rozkladových zařízení - skenerů. Skenery snímají zemský povrch postupně po úzkých řádcích. Odlišná technika jejich vytváření vnáší do těchto snímků i typická zkreslení a nepřesnosti, odlišné od fotografií. Tyto **obrazové záznamy** (v angličtině imagery) se vyznačují obecně menším prostorovým detailem, který mohou zachytit ve srovnání s fotografií, na druhé straně však mohou být pořizovány ve značně široké části elektromagnetického spektra. V současnosti jsou poskytovány v naprosté většině případů

v číslicové (digitální) podobě, která umožňuje jejich automatické zpracování. Právě systému pořizování obrazových záznamů a jejich následnému digitálnímu zpracování je především věnován následující text. Techniky vytváření digitálních obrazových záznamů za pomoci skenerů je většinou využíváno na družicových nosičích i když řada systémů funguje i na letadlech.

Podle zdroje elektromagnetického záření, které je nositelem informace o objektech zkoumaných na dálku, lze metody DPZ dělit na **aktivní** a **pasivní**. Pasivní metody se pak dále dělí na přímé a nepřímé. U pasivních metod přímých je zdrojem informace záření Slunce, odražené od zemského povrchu. Příkladem přímé pasivní metody je tedy každá letecká fotografie. U nepřímých metod je zdrojem měření záření vyzařované objekty na zemském povrchu nebo v atmosféře. Klasickým příkladem nepřímých metod je tzv. **termovize** - zjišťování informací o teplotních vlastnostech objektů..

Skupina aktivních metod představuje způsoby vytváření obrazového záznamu, u kterých zdroj záření není přirozeného původu, ale záření je uměle (aktivně) vysíláno ze zdroje umístěného na nosiči. Část záření se od objektů odráží a je zachycována zpět na nosiči. Typickým příkladem aktivních metod v DPZ jsou tzv. **radarové systémy**.

Dále je uveden výčet dalších možných hledisek, podle kterých lze obrazové materiály pořízené distančním měřením dělit:

- podle druhu nosiče, kterým mohou být letadla, družice, modely letadel, balóny, vrtulníky nebo i pozemní základny
- podle zaznamenané části elektromagnetického spektra (např. panchromatické, infračervené, tepelné, radarové (mikrovlnné))
- podle barvy se obrazové materiály dělí na černobílé a barevné. Barevné snímky mohou být v barvách přirozených nebo nepřirozených
- podle osy záběru se snímky dělí na svislé a šikmé
- podle zorného pole kamery se dělí na snímky s úzkým úhlem, normální a širokoúhlé
- podle velikosti snímaného území: globální, oblastní, lokální a detailní.

1.3 Historický přehled

Vývoj a pokrok v technologii distančního snímání je vázán především na rozvoj možností nosičů, ze kterých se snímání provádí, dále na rozvoj přístrojů a zařízení, kterými je snímána určitá část elektromagnetického spektra a v současné době především na rozvoj výpočetní techniky umožňující automatické zpracování obrazových materiálů.

Rozvoj dálkového průzkumu Země tedy úzce souvisí jak s fyzikálními objevy v oblasti teorie vlnění, s historií letectví, s historií fotografie i s historií dobývání kosmu. Dále jsou uvedena některá základní fakta, zájemce o podrobnější informace lze odkázat například na práce JEŘÁBKA (1982), SIMONETTA (1983), LILLESANDA a KIEFERA (1994) nebo CAMPBELLA (1996), z nichž je v následujícím přehledu čerpáno.

V roce 1666 Isaac Newton dokázal za pomoci optického hranolu rozložit „bílé“ světlo na jednotlivé spektrální barvy. Roku 1800 sir W. Herschel objevil infračervené záření a v roce 1847 A.H.L. Fizeau a J.B.L. Foucault prokázali, že infračervené záření se vyznačuje podobnými vlastnostmi jako viditelné světlo. V roce 1873 zformuloval J.C. Maxwell teorii elektromagnetického záření

O objev fotografie se zasloužili především Nicephore Niepce, William Henry Fox Talbot či Louis Jacques Mande Daguerre v roce 1839. První známá fotografie pořízená z výšky je spojena s francouzským fotografem Tournaconem (Nadar), který v roce 1858 pořídil z balónu z výšky asi 80 metrů fotografii městečka Bievre blízko Paříže. V roce 1860 pořídil fotografii Bostonu z balónu J.W. Black. Vedle balónů bylo v počátcích jako nosičů využíváno také různých draků. Právě z takového nosiče pochází známá šikmá fotografie San Francisca z konce května roku 1906, pořízená krátce po ničivém zemětřesení, které postihlo toto město. Roku 1903 si J. Neubronne nechal patentovat fotografickou komoru připevněnou na prsou poštovního holuba (obr. 1.1).

Také krátce po vynálezu letadla na počátku 20. století byly učiněny první pokusy s fotografováním z tohoto nosiče. První snímek pořízený z letadla byl pokus fotografa doprovázejícího let W. Wrighta v Centocelli (Itálie) v roce 1909. Výrazný rozvoj leteckého snímkování znamenala potom první a druhá světová válka. Letecké snímkování především pro vojenské účely, ale také pro topografická mapování, pro aplikace v lesnictví a zemědělství a pro fotogrammetrická měření. Rozvíjí se také teorie interpretace letecké fotografie. Pro letecké snímkování je používáno speciálně zkonstruovaných kamer. Jak uvádí JERÁBEK (1982), první fotografie našeho území (část Prahy kolem současného Výstaviště) byly pořízeny z balónu J. Plischkem v letech 1906 a 1908.

Dalším milníkem bylo období konce druhé světové války. Tato perioda znamená především počátky raketové techniky, tedy první kroky letů do kosmu a také s vynálezem radaru je k získávání informací o objektech na dálku využíváno nových oblastí elektromagnetického spektra - mikrovln. Pro vojenské účely je využíváno barevné infračervené fotografie (tzv. Camouflage detection film), který později představuje významný pokrok v oblasti monitorování zdravotního stavu vegetace. Za první významnou civilní aplikaci považuje CAMPBELL (1996) práci Roberta Colwella z roku 1956 využívající barevného infračerveného filmu pro identifikaci škod na obilninách. V letech 1946 až 1950 byly učiněny v Novém Mexiku první pokusy s původními německými raketami V-2 a od té doby začíná mohutný rozvoj dobývání kosmu. Žádná z velkého množství prvních umělých družic Země vypouštěných v 50. letech však nebyla určena k snímkování zemského povrchu. Podle ČAPKA (1988) pořídila první snímek zemského povrchu americká družice Explorer VI v roce 1958. Za počátek družicového dálkového průzkumu Země lze považovat vypuštění meteorologické družice **TIROS-1** v roce 1960. V 60. letech přinesly velké množství fotografií zemského povrchu programy prvních pilotovaných kosmických lodí Mercury, Gemini a Apollo. První snímky prezentovaly svůj potenciál především v geologických a geomorfologických aplikacích. Z lodi Apollo 9 byla pořízena řada barevných snímků. V 60. letech se také začíná formovat z původně komunikačních družic systém tzv. geostacionárních družic, v současné době monitorující vývoj počasí na celé zeměkouli. S využitím aktivních metod snímání objektů mikrovlnným zářením prostřednictvím radaru bylo dosaženo daleko menší závislosti snímání na podmínkách počasí. První velké projekty využívající radaru k byly uskutečněny v Latinské Americe na konci 60. let.

Skutečným milníkem pro tematické mapování metodou dálkového průzkumu Země bylo vypuštění družice **ERTS-1** (později LANDSAT 1) v roce 1972. Širokému okruhu potenciálních uživatelů se tak do rukou dostalo množství snímků s poměrně dobrým prostorovým rozlišením. Protože stále více obrazových záznamů bylo poskytováno v číslicové podobě, začínají se intenzivně rozvíjet také metody digitálního zpracování.

V 80. letech se k obrazovým záznamům ze systému družic LANDSAT přibývají i snímky z družic SPOT. Jejich prostorové rozlišení i geometrická kvalita umožňují zpracování postupy používanými ve fotogrammetrii a sestavovat jak přesné topografické mapy řady zemí, kde doposud mapová díla chyběla, tak také takové produkty, jako digitální model terénu. V 80. letech jsou testovány možnosti tzv. syntetického radaru (SAR) umístěného na amerických raketoplánech a na oběžnou dráhu jsou poté umísťovány radarové družicové systémy, jejichž produktů lze využívat komerčně.

Boom výpočetní techniky na konci 80. a počátku 90. let dovoluje převést některé klasické úlohy fotogrammetrie na počítač, formuje se tzv. **digitální fotogrammetrie** (MARŠÍK, 1997) pracující s leteckou fotografií v digitální podobě, digitalizovanou s vysokým rozlišením či s obrazovým záznamem z družice. Automatické zpracování dovoluje i výpočetně velmi náročná zpracování, které bylo obtížné realizovat při práci s analogovými materiály.

V 80. letech podporuje NASA v laboratořích v Pasadeně (Jet Propulsion Laboratory) vývoj tzv. **hyperspektrálních systémů**, poskytujících data ze značného množství (několik set) úzce vymezených pásem spektra. Tyto systémy jsou využívány v tzv. obrazové spektrometrii (CURRAN 1994) a umožňují nové přístupy k identifikaci nejen základních tříd pokryvu země, ale například i jednotlivých minerálů. Uvedený přístup dovoluje dále získávat i kvantitativní data o míře znečištění, obsahu určitých prvků apod. V současné době je v důsledku technických problémů neustále odkládáno vypuštění prvních tzv. *smallsats* - tedy družic vytvořených soukromými organizacemi a vybavenými snímacím zařízením, které by mělo poskytovat obrazové záznamy s prostorovým rozlišením lepším jak 1 metr. Tedy geometrická kvalita těchto obrazových záznamů by měla být postupně srovnatelná s klasickou fotografií. V současné době je nejbližší k vyslání své družice společnost EarthWatch, vypuštění její družice *EarlyBird* na konci roku 1997 však skončilo neúspěchem. Příklady těchto dat lze nalézt na adrese <http://www.digitalglobe.com> a jejich možnosti pro začlenění do GIS či pro nejrůznější environmentální aplikace uvádějí např. JORDAN (1996) nebo CORBLEY (1996a,b,c).

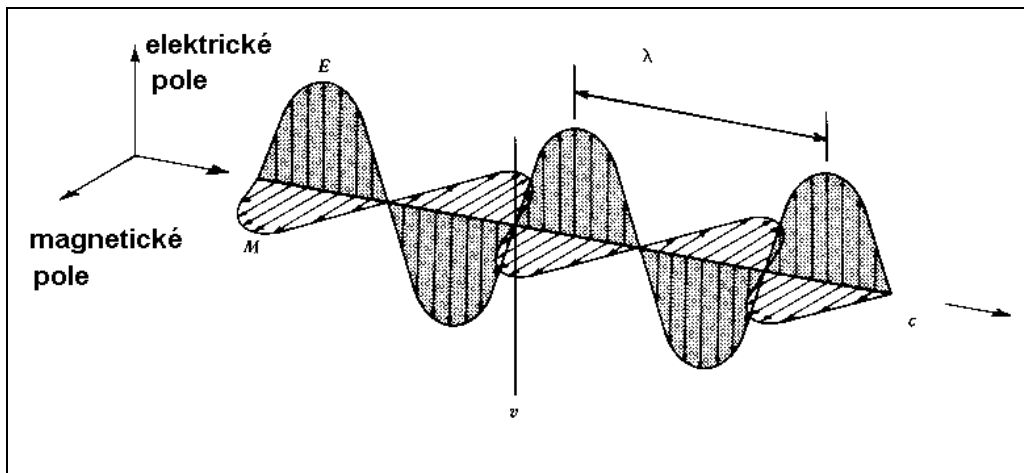
Vedle toho, že pro řadu vědních disciplín se data získaná distančním snímáním zemského povrchu stávají nezbytnou součástí jejich dalšího rozvoje (synoptická meteorologie, klimatologie, tématická kartografie atd.), dálkový průzkum Země se také etabluje jako samostatná vědecká disciplína a nezbytná součást geoinformatiky s vlastními metodami výzkumu, vědeckými konferencemi, časopisy apod. Jestliže na počátku 90. let tvořila data získaná distančním snímáním zemského povrchu kolem 20 % informací vstupujících do nejrůznějších geografických informačních systémů, na počátku nového tisíciletí by to mělo být již více jak 80 % (CARRY 1994).

2. Fyzikální podstata dálkového průzkumu Země

Distanční snímání zemského povrchu je založeno na poznatku, že objekty či jevy, které se na tomto povrchu nacházejí, určitým charakteristickým způsobem ovlivňují své okolí. Například jinak své okolí ovlivňuje vodní hladina rybníka a jinak střechy domů. Toto ovlivnění je charakteristické nejen pro určitý typ objektu (rybník, střecha), ale i pro jeho určité vlastnosti (barva, teplota či obsah sedimentů). Objekty tedy o sobě vydávají prostřednictvím určitých tzv. silových polí informace. Tyto informace lze zjistit na dálku právě měřením charakteristik těchto polí (KOLÁŘ 1990). Také člověk získává některými svými smysly, jako například zrakem nebo sluchem, určité informace o svém okolí „na dálku“. Silovým polem, jehož charakteristiky se v dálkovém průzkumu zaznamenávají, je tzv. **elektromagnetické pole (záření)**. Jedním z jeho projevů je tzv. viditelné záření, na které je citlivý lidský zrak. Časem byla vyvinuta celá řada přístrojů, které nejprve zdokonalovaly lidské vidění v oblasti viditelného světla a které poté také umožňovaly registrovat i jevy a údaje i mimo viditelné světlo - tedy „neozbrojenému“ oku neviditelné. Jak uvádí KOLÁŘ (1990), dalšími přednostmi tohoto druhu záření je fakt, že se v přírodě vyskytuje v rozličných formách daných například jeho vlnovou délkou (viz dále). Toto záření je modifikováno atmosférou, kterou se šíří, pouze v určitých formách a pouze do jisté míry, a v neposlední řadě zaznamenávané charakteristiky tohoto záření je možné kvantifikovat.

2.1 Elektromagnetické spektrum

DPZ získává informace o objektech a jevech prostřednictvím elektromagnetického záření. Energie tohoto záření spočívá ve vlnění - šíří se tedy prostorem ve tvaru tzv. **elektromagnetické vlny**. Její schéma je uvedeno na obr. 2.1.

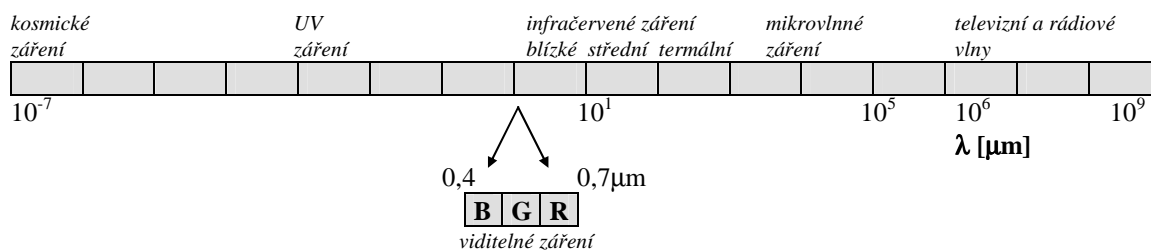


Obr. 2. Chyba! Neznámý argument přepínače. Schéma elektromagnetické vlny

Elektromagnetická vlna se skládá ze dvou komponent - sinusoidy elektrické vlny E a magnetické vlny M, obě spolu svírají pravý úhel, jsou rovnoběžné ve směru šíření a šíří se rychlostí světla c . Základními charakteristikami elektromagnetického záření jsou jeho **vlnová délka** (λ) a **frekvence** (ν). Jak plyne z obrázku, vlnová délka je vzdálenost dvou sousedních vrcholů vlny. Frekvence je potom počet vrcholů vlny procházejících fixním bodem za jednotku času. Mezi frekvencí a vlnovou délkou je nepřímá úměra:

$$c = \lambda \nu$$

Elektromagnetické záření se může v přírodě vyskytovat ve spojitém spektru, jehož rozsah je téměř 20 řádů. Celé spektrum se např. podle vlnové délky dělí do několika základních oblastí. Toto dělení je používáno spíše konvenčně a je dáno například odlišnými způsoby měření v jeho jednotlivých částech. Celé spektrum je schematicky znázorněno na obr. 2.2



Obr. 2. Chyba! Neznámý argument přepínače. Základní oblasti elektromagnetického spektra

Viditelná část spektra, na niž je citlivé lidské oko, je tedy pouze jednou z mnoha forem elektromagnetické energie. V počátcích DPZ se využívalo pouze snímků ve viditelné části spektra, která zahrnuje vlnové délky v intervalu zhruba 0,4 až 0,7 mikrometrů. S technickým pokrokem se část spektra využitelná v DPZ postupně rozšiřovala do dalších oblastí vlnových délek. V současnosti se využívá záření v intervalu vlnových délek zhruba od 0,1 mikrometrů do 1 metru.

2.2 Základní zákony záření, vyzařování Slunce a Země

Pro pochopení principu měření distanční metodou a především pro následně uvedené základy tzv. spektrálního chování objektů jsou dále naznačeny základní vztahy z oblasti teorie vlnění a základních zákonů záření. Případně zájemce o podrobnější výklad lze odkázat především na učebnice fyziky, z oblasti dálkového průzkumu Země na práce KOLÁŘE (1990), KOLÁŘE a kol. (1997), ze zahraničních prací potom BARRETTA a CURTISE (1976) nebo LILLESANDA a KIEFERA (1994).

Výše popsaná teorie popisuje elektromagnetické záření tzv. **vlnovou teorií**. Jinou teorií vhodnou pro popis interakcí elektromagnetického záření s objekty na zemském povrchu je tzv. **částicová teorie**, spojená se jmény M. Plancka (1858-1947) a A. Einsteina (1879-1955) (CAMPBELL 1996). Tato teorie předpokládá, že elektromagnetické záření se sestává z jednotlivých částic nazývaných fotony nebo kvanta. Energie kvanta Q je dána následujícím vztahem:

$$Q = h \nu,$$

kde Q - energie kvanta
 h - Planckova konstanta
 ν - frekvence

Vztah mezi vlnovou a částicovou teorií lze vyjádřit vztahem:

$$Q = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Z uvedeného plyne, že energie částice je tedy nepřímo úměrná vlnové délce. Čím delší vlnová délka, tím nižší obsah energie má záření. To má velký význam pro DPZ. Přirozeně emitované dlouhovlnné záření bude hůře zjištěné než energie krátkovlnná. Nízký obsah energie dlouhovlnného záření znamená, že systémy operující v dlouhých

vlnových délkách musí při jednom měření snímat velké plochy zemského povrchu, aby přijaly signál, který bude měřící aparatura schopna zaznamenat.

Elektromagnetické záření emitují nebo odrážejí všechny objekty, jejichž teplota je větší než absolutní nula ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Zdrojem tohoto záření může být Slunce nebo Země. To jak záření vypadá, jaké má charakteristiky, vyplývá ze **základních zákonů záření**. Jsou to zákony popisující přeměnu tepelné energie na energii zářivou. Protože v přírodě je tento proces velmi složitý, zjednodušuje se modelem tzv. **absolutně černého tělesa**. Vychází se z předpokladu, že absolutně černé těleso při přeměně tepelné energie na zářivou se přemění a pohltí maximální množství energie při dané teplotě.

Množství vyzařené energie objektem je funkcí jeho teploty. Tato vlastnost je vyjádřena tzv. **Stefan-Boltzmannovým zákonem**. Ten lze vyjádřit následujícím vztahem:

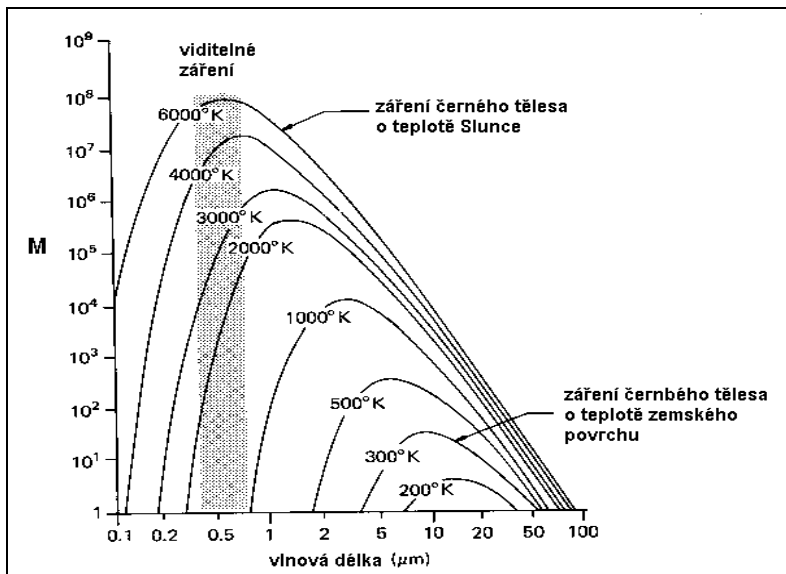
$$M = \sigma \cdot T^4$$

kde M - intenzita vyzařování z povrchu tělesa
 σ - Stefan Boltzmannova konstanta
 T - absolutní teplota tělesa

Zákon říká, že intenzita vyzařování tělesa je přímo úměrná čtvrté mocnině jeho teploty. Druhým důležitým zákonem záření je tzv. **Wiennův zákon posuvu**, který je vyjádřen vztahem:

$$\lambda_{\max} = \frac{k}{T}$$

a říká, že vlnová délka, již přísluší maximální intenzita vyzařování (λ_{\max}), je nepřímo úměrná teplotě tělesa T , k je konstanta ($2898\text{ }\mu\text{m} \cdot \text{K}$). Oba výše uvedené základní zákony záření jsou schematicky znázorněny na obr. 2.3.



Obr. 2. Chyba! Neznámý argument přepínače. Příklady intenzity vyzařování (M) absolutně černého tělesa o různé teplotě

Z uvedených zákonů záření plyne, že Slunce maximálně vyzařuje v oblasti viditelné části spektra ve vlnových délkách kolem 0,5 mikrometrů. Země má maximum vyzařování v tepelné oblasti elektromagnetického záření ve vlnových délkách kolem 9,7

mikrometrů. Pro dálkový průzkum z toho tedy plyne, že čím vyšší bude teplota tělesa, tím více bude vyzařovat energie o kratší vlnové délce. „Horké“ objekty budou vyzařovat krátkovlnné záření o vysoké frekvenci a budou tedy dobře detekovatelné metodami dálkového průzkumu, protože toto záření bude intenzivní. Naopak chladné objekty budou vyzařovat málo intenzivní dlouhovlnné záření, a proto budou hůře zjistitelné. Zároveň platí, že čím kratší vlnová délka záření, tím detailněji podchycuje terén (KOLÁŘ 1990). Atmosféra však dobře propouští dlouhovlnné záření, krátké vlny značně pohlcuje a rozptyluje. Průchodnost atmosférou a rozlišovací schopnost se mají k délce vlny opačně. Metodami dálkového průzkumu se tedy zaznamenává odražené krátkovlnné záření Slunce, a nebo záření dlouhovlnné vyzářené objekty na zemském povrchu. Uvedené vztahy však platí pouze globálně, ve skutečnosti je průchod záření atmosférou značně ovlivňován.

Je nutno také poznamenat, že uvedené vztahy platí pro absolutně černé těleso. Reálné objekty o stejné teplotě mohou vyzařovat různé množství energie, avšak vždy menší, než absolutně černé těleso. Tuto skutečnost definuje **Kirkhofův zákon**, podle kterého intenzita vyzařování reálného tělesa s teplotou T je pro toto těleso typická a je vždy menší, než intenzita vyzařování absolutně černého tělesa o stejné teplotě. Tento zákon umožňuje definovat tzv. **emisivitu** (ε) jako poměr mezi intenzitou vyzařování reálného tělesa (M_R) a intenzitou vyzařování černého tělesa (M_A) o dané teplotě T :

$$\varepsilon = \frac{M_R}{M_A}$$

Emisivita je dále diskutována v části zabývající se DPZ v termální oblasti spektra.

2.3 Ovlivnění elektromagnetického záření atmosférou

Vlivy atmosféry na charakteristiky elektromagnetického záření se mění s délkou dráhy, kterou toto záření prochází atmosférou, s velikostí emitovaného signálu, s atmosférickými podmínkami a také s vlnovou délkou. Atmosféra má tedy velký vliv na intenzitu a spektrální složení záření, které bude zachyceno měřicím zařízením. Záření je ovlivňováno především **pohlcováním a rozptylem**.

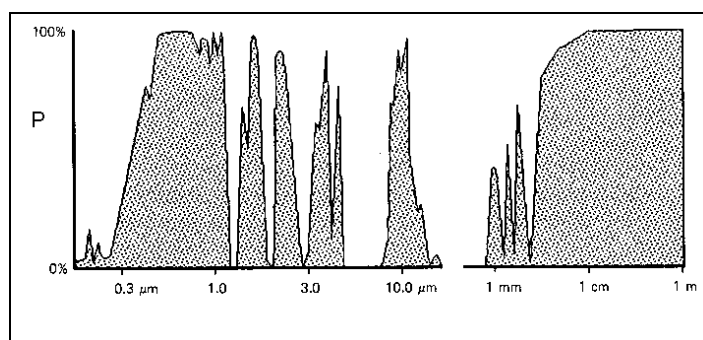
Charakter rozptylu záření v atmosféře závisí především na rozměru rozptylujících částic. Těmi mohou být jak jednotlivé molekuly plynů v atmosféře, tak aerosoly. Částice, které mají mnohem menší rozměr než vlnová délka záření, způsobují tzv. **Rayleighův (molekulární) rozptyl**. Jeho velikost je nepřímo úměrná čtvrté mocnině vlnové délky záření. Ovlivňuje tedy především krátkovlnné záření. Výsledkem Rayleighova rozptylu je například modrá barva oblohy. V době západu a východu Slunce procházejí sluneční paprsky daleko delší dráhou a rozptyl a pohlcování krátkovlnného záření je tak dokonalý, že vidíme pouze méně rozptýlené záření delších vlnových délek - tedy oranžovou a červenou část spektra. Rayleighův rozptyl je příčinou zákalu na obrazových materiálech získaných distančním měřením a snižuje jejich ostrost a kontrast.

Druhým typem rozptylu je tzv. **aerosolový rozptyl**, který vzniká, jestliže průměry rozptylujících částic jsou větší než vlnová délka záření. Tento rozptyl je způsobován například vodní parou a prachovými částicemi. Aerosolový rozptyl závisí v menší míře na vlnové délce záření než rozptyl Rayleighův.

Velké částice jako například vodní kapičky potom způsobují tzv. **neselektivní rozptyl**, tedy takový, který nezávisí na vlnové délce. Způsobuje tedy stejně intenzivní rozptyl

všech vlnových délek ve viditelné části spektra a výsledkem je tedy například bílá barva oblaků a mlhy.

Pohlcování záření je na rozdíl od rozptylu příčinou ztrát energie na dané vlnové délce. Hlavními plyny pohlcujícími záření jsou O_3 , CO_2 a vodní pára. Uvedené plyny pohlcují s různou intenzitou záření v určitých intervalech vlnových délek a prakticky tak znemožňují zaznamenávat a měřit intenzitu elektromagnetického záření. Části elektromagnetického spektra, které nejsou ovlivňovány pohlcováním a rozptylem, se nazývají tzv. **atmosférická okna**. Části spektra, ve kterých je energie pohlcována, a atmosférická okna znázorňuje obr. 2.4 a také je shrnuje tabulka 2.1. Atmosférická okna tedy zahrnují především viditelné vlnové délky. V oblasti termálního záření to jsou intervaly zhruba 3-5 mikrometrů a 8-14 mikrometrů, další atmosférické okno se nachází v oblasti mikrovln.



Obr. 2. Chyba! Neznámý argument přepínače.

Propustnost atmosféry (P) pro záření v závislosti na jeho vlnové délce (podle LEGGA 1994)

Vyšrafované části spektra na obr. 2.4 představují atmosférická okna - oblasti, ve kterých je záření atmosférou minimálně modifikováno, zbývající části spektra jsou představovány tzv. absorpčními pásy jednotlivých plynů.

Tab. 2.1 Hlavní atmosférická okna ve viditelné a infračervené části spektra (podle LINTZE a SIMONETTA 1976)

Část spektra	interval vlnových délek [μm]
UV/viditelné záření	0,30 - 0,75
	0,77 - 0,91
blízké infračervené záření	1,00 - 1,12
	1,19 - 1,34
	1,55 - 1,75
	2,05 - 2,40
střední infračervené záření	3,50 - 4,16
	4,50 - 5,00
termální infračervené záření	8,00 - 9,20
	10,20 - 12,40
	17,00 - 22,00

Jak uvádí JENSEN (1986), pro distanční snímání zemského povrchu je dále důležité, že rozptyl obecně způsobuje vyšší hodnoty naměřeného záření především v kratších vlnových délkách. Pohlcováním jsou pak snižovány naměřené hodnoty elektromagnetického záření v delších vlnových délkách.

2.4 Ovlivnění záření na zemském povrchu

Elektromagnetická energie dopadající na zemský povrch může být objekty odražena, pohlcována a vedena. Především množství reflektované energie se bude měnit pro různé povrchy v závislosti na jejich vlastnostech. V závislosti na chemickém složení i jeho aktuálním fyzikálním stavu bude možno každý typ povrchu charakterizovat podle množství reflektovaného záření. Toto množství však bude závislé i na vlnové délce záření. Dva objekty, které například odrážejí podobné množství záření v jednom intervalu vlnových délek, mohou v jiném intervalu odrážet rozdílné množství energie. Na tomto principu je založena teorie tzv. spektrálního chování (LILLESAND a KIEFER 1994). V rámci viditelných vlnových délek se tato selektivita k určitým vlnovým délkám záření projevuje efektem barvy objektů. Objekt se nám jeví jako modrý, odráží-li především modrou část spektra. To, jakým způsobem povrch odráží záření, je funkcí také drsnosti povrchu (viz kapitola 5). Podle drsnosti povrchu může být odraz zrcadlový (hladké povrchy) nebo difúzní (drsne povrchy). Zde však významnou roli hraje vlnová délka dopadajícího záření (KOLÁŘ 1990). Písek se může ve viditelné části spektra chovat jako drsný povrch, v oblasti mikrovln naopak jako hladký povrch. Množství odraženého, pohlceného a transmittovaného záření dále závisí na fyzikálních a chemických vlastnostech povrchů. Z fyzikálních vlastností má velký význam například obsah vody. Chemické složení (obsah určitých minerálů) také výrazně ovlivňuje interakci záření s objektem.

Odrazové vlastnosti povrchů tedy mohou být kvantifikovány například jako procentuální podíl záření odraženého k množství záření dopadajícího. Tato veličina je funkcí vlnové délky a nazývá se **spektrální odrazivost**. Pro stejnou třídu objektů, jako je například vodní plocha, povrch krytý vegetací nebo holou půdou nabývá odrazivost v určité části spektra (pro určitou vlnovou délku) typických hodnot a tyto povrchy mají tedy určité tzv. **spektrální chování**.

2.5 Charakteristika základních oblastí elektromagnetického spektra využitelných v DPZ

V závislosti na rozvoji techniky a na možnostech snímacích zařízení se postupem doby zformovalo 6 základních oblastí elektromagnetického spektra využitelných k získávání informací o zemském povrchu či atmosféře prostřednictvím distančního měření odraženého nebo vyzářeného elektromagnetického záření. Jejich přesné vymezení z hlediska vlnové délky se může u jednotlivých autorů lišit - srov. například ČAPEK(1988), LEGG (1994) a nebo LILLESAND a KIEFER (1994). Stručná charakteristika těchto základních oblastí elektromagnetického spektra je tato:

- ultrafialové záření (0,1 až 0,4 mikrometrů)
- viditelné záření (0,4 až 0,7 mikrometrů)
- infračervené záření blízké (0,7 až 1,4 mikrometrů)
- infračervené záření střední (1,4 až 3 mikrometry)
- tepelné záření (3 mikrometry až 1 mm)
- mikrovlnné záření (1 mm až 1m)

K zemskému povrchu je propouštěna pouze malá část **ultrafialového záření**, většinou je tato část spektra výrazně pohlcována atmosférou. Tato nevýhoda pro DPZ je velkou výhodou pro živé organismy, pro které je toto krátkovlnné záření škodlivé. V DPZ byly

s těmito vlnovými délkami testovány možnosti aktivních metod s tzv. UV laserem, např. pro vyhledávání ložisek zlata (LEGG 1994), ale také pro monitorování ropných skvrn. Toto záření také do jisté míry prochází vodním sloupcem. UV část spektra je velmi zajímavá především pro geologické aplikace, mnoho minerálů vydává charakteristické záření v těchto vlnových délkách, lze je tedy snadněji identifikovat. Problémem je ale silné pohlcování UV záření atmosférou; pouze jeho malá část se od Slunce dostává k Zemi.

Viditelné záření zabírá jedno z největších atmosférických oken. Schematicky lze viditelné záření dále dělit na část modrého světla (0,4-0,5 μm), zeleného světla (0,5-0,6 μm) a červeného světla (0,6-0,7 μm). V čisté a suché atmosféře je viditelné záření ovlivňováno velmi málo, různými aerosoly je však viditelné záření poměrně značně rozptylováno a pohlcováno, neprochází tedy oblačností a mlhou. Zdrojem tohoto krátkovlnného záření je Slunce - lze ho tedy zaznamenávat pouze v denních hodinách. Ve srovnání s delšími vlnovými délkami je toto záření schopno procházet vodním sloupcem - především v modré části spektra. Jak uvádí CRACKNELL a HAYES (1993), modré světlo může pronikat čistou vodou v oceánu do hloubek 20 až 30 metrů, zatímco v červené části viditelného spektra je záření vodou výrazně pohlcováno. To umožňuje studovat mnoho fyzikálních i biologických vlastností vodních objektů.

I když je viditelné záření nejvyužívanější částí spektra především z historického hlediska, v mnoha aplikacích není jeho použití nejvýhodnější (BARRETT a CURTIS 1976). Jednotlivé horniny, minerály ani půda neukazují odlišnosti ve spektrálním chování ve viditelné části spektra. Navíc jsou tyto krátké vlnové délky atmosférou ještě značně rozptylovány a pohlcovány. To má za následek např. ztrátu kontrastu viditelných snímků. V oblasti viditelného záření však pracují všechny konvenční metody pořizování obrazových dat, také většina družicových systémů poskytuje data ve viditelné části spektra.

Oblast **blízkého infračerveného záření** tvoří pokračování atmosférického okna z viditelné části spektra. Záření se tedy chová podobně. Lze je zaznamenávat jak konvenčními fotografickými metodami, tak i elektronicky. Je již méně pohlcováno a rozptylováno atmosférou. V důsledku toho jsou snímky ostré s dobrým kontrastem. Hodí se k topografickým účelům, důležité jsou tyto vlnové délky pro studium vegetace především v lesnictví a zemědělství. Voda se v těchto vlnových délkách chová téměř jako absolutně černé těleso.

Oblast **středního infračerveného záření** zahrnuje dvě atmosférická okna se středy přibližně 1,5 a 2,2 mikrometrů. Obě jsou nejdůležitější především pro vegetační a geologické studie. První okno například umožňuje dobré rozlišení druhů vegetace, hodí se k rozpoznávání ledu a sněhu, k odlišení oblačnosti a ke studiu zdravotního stavu vegetace. Druhé okno je oblastí, ve které má mnoho minerálů charakteristický absorpční pás. V blízké i střední části elektromagnetického spektra je množství odraženého záření výrazně větší, než množství záření emitovaného. V důsledku tohoto malého množství emitovaného záření nelze blízké a střední infračervené vlnové délky využít k zjišťování teplotních vlastností povrchů, to je možné až v oblasti termálního infračerveného záření, kde je podíl emitovaného záření větší.

Tepelné infračervené záření obsahuje opět dvě atmosférická okna v intervalu přibližně 3 až 5 a 8 až 12 mikrometrů. Pokud jsou tepelná čidla přesně kalibrována, umožňují získávat poznatky o tepelné bilanci objektů, používají se například k zjišťování

povrchové teploty oceánů (SST), k mapování tepelného znečištění řek a jezer i samotné krajiny, dále například k lokalizaci lesních požárů a podobně.

Protože v oblasti 3-5 mikrometrů je ještě množství odraženého záření poměrně značné, k měření radiační teploty lze využívat pouze nočních hodin. Naopak v oblasti 8-12 mikrometrů je již množství odraženého slunečního záření ve srovnání s emitovaným zářením velmi malé, těchto vlnových délek potom lze využít ke zjišťování radiační teploty i během denních hodin. Avšak i ve zmíněných atmosférických oknech je záření atmosférou poměrně značně ovlivňováno, a tak řada systémů poskytuje pouze kvalitativní údaje. K přesným kvantitativním měřením je nutná dobrá znalost tzv. **emisivity** objektů a procesů, které ovlivňují záření v atmosféře. Tyto procesy jsou modelovány při tzv. atmosférických korekcích v rámci předzpracování materiálů dálkového průzkumu Země.

Mikrovlnné záření se dělí do několika pásem a je využíváno i při pasivním snímání, ale především na aktivních systémech - radarech. Tyto dlouhé vlnové délky mohou za vhodných podmínek pronikat i pod povrch a ze všech uvedených oblastí záření nejméně závisí na podmínkách počasí, šíření mikrovlnného záření je výrazně zeslabováno pouze v případě vydatného deště. Navíc tohoto poznatku je využíváno především v meteorologických aplikacích k zjišťování srážkových oblastí či intenzity srážek. Protože intenzita emitovaného mikrovlnného záření je velmi nízká, musí měřicí zařízení k zachycení detekovatelného signálu měřit toto záření na poměrně velké ploše, což je příčinou malého prostorového rozlišení dat získaných pasivními metodami v mikrovlnné části spektra. Naproti tomu aktivní systémy zaznamenávají v poslední době značný rozvoj a poskytují stále kvalitnější data využitelná například při studiu reliéfu nebo studiu plovoucího ledu, v geomorfologii, v lesnictví i zemědělství a řadě dalších aplikací - viz např. WOODING (1988), LILLESAND a KIEFER (1994) nebo CAMPBELL (1996). Pomocí aktivních mikrovlnných systémů lze získat i neobrazová data, informace o výškových poměrech, o řadě meteorologických prvků atd.

2.6 Spektrální chování objektů

Sluneční záření dopadající na zemský povrch je zčásti absorbováno, zčásti vedeno do nižších vrstev a zčásti odráženo zpět do atmosféry. Jak při průchodu atmosférou k zemskému povrchu, tak na své cestě zpět po odrazu (reflexi) je záření do značné míry dále modifikováno. Dalším změnám toto záření podléhá přímo na zemském povrchu.

Intenzita odraženého krátkovlnného záření, ale i intenzita emitovaného záření dlouhovlnného tedy závisí především na těchto faktorech:

- na druhu látky či objektu (např. na jeho chemickém složení, apod.)
- na jeho fyzikálním stavu (obsahu vlhkosti, zhutnění povrchu, atd.)
- na stavu jeho okolí (např. na propustnosti atmosféry, apod.)

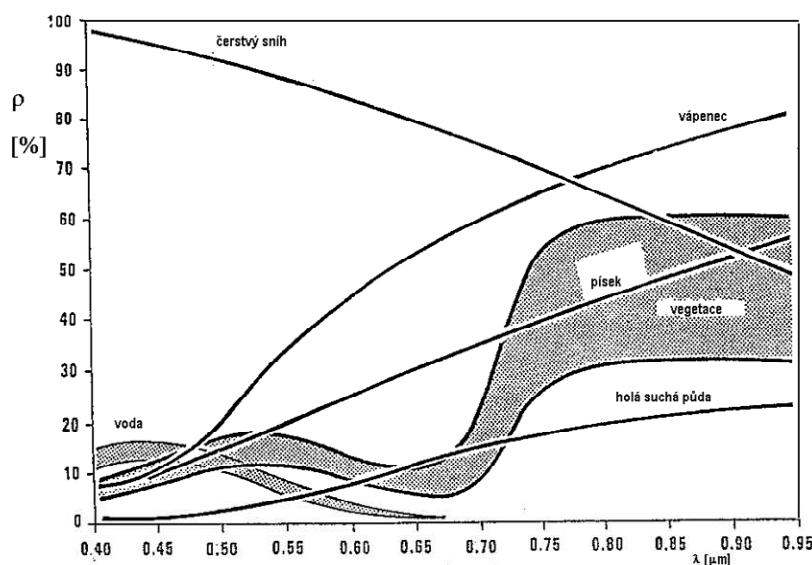
Množství odraženého záření lze charakterizovat tzv. **spektrální odrazivostí** $\rho(\lambda)$, kterou lze definovat například jako poměr intenzity odraženého záření (M_r) a intenzity záření dopadajícího (M_i) na určité vlnové délce (λ) udávaný např. v procentech, tedy:

$$\rho(\lambda) = \frac{M_r(\lambda)}{M_i(\lambda)} \cdot 100[\%]$$

Přes všechny vlivy, které způsobuje atmosféra a interakce záření na zemském povrchu i přes všechny vlivy, které jsou způsobeny fyzikálním stavem objektů, lze konstatovat, že

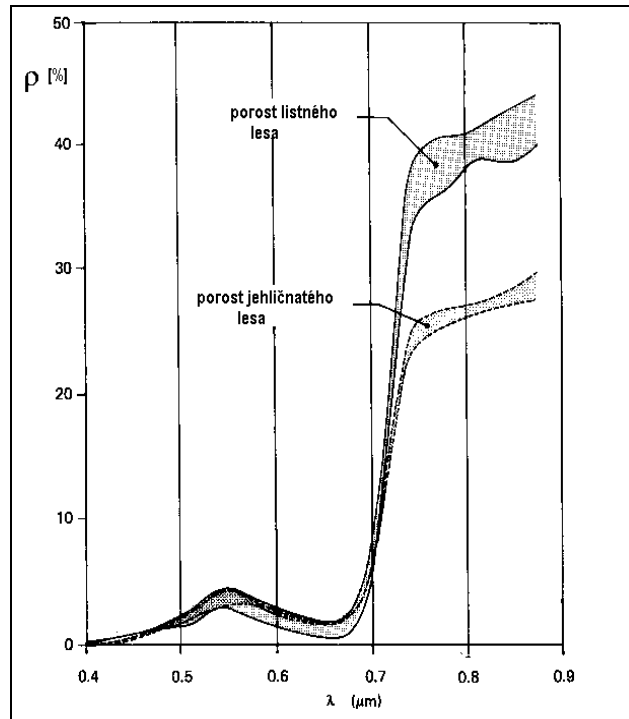
každá látka na zemském povrchu se vyznačuje svoji vlastní spektrální charakteristikou. Z porovnání několika snímků stejné krajiny pořízených v různých částech elektromagnetického spektra je zřejmé, že některé objekty jsou dobře rozpoznatelné na snímcích viditelných, jiné na snímcích infračervených. To, jestli je objekt na určitém snímku vidět, je dáno množstvím odraženého záření. Odráží-li objekt málo světla, bude se na snímku jevit jako tmavý a naopak. K rozpoznání každého objektu jsou však také důležité vlastnosti objektů okolních. Odráží-li dva sousední objekty stejné množství záření na čidlo detektoru, bude problém je na snímku či obrazovém záznamu rozpoznat. Protože se ale odrazivost objektů mění s vlnovou délkou záření, lze naopak teoreticky nalézt takový interval vlnových délek, v kterém se odrazivost dvou sousedních objektů významně liší a jsou tudíž snadno rozpoznatelné. Pro daný objekt lze sestavit závislost mezi jeho odrazivostí a vlnovou délkou a průběh této závislosti bude pro tento objekt více méně typický. Tato charakteristika, někdy označovaná jako tzv. **spektrální křivka odrazivosti** je projevem tzv. **spektrálního chování objektů**. Tvar křivky má velký vliv na výběr vlnové délky, ve které je vhodné data o objektu získávat. Křivky spektrálního chování mají pro stejnou třídu objektů (vegetace, holá půda) vždy typický průběh, jak ukazuje obr. 2.5.

Odhlédneme-li od externích vlivů atmosféry, kterým se záření šíří, množství odraženého záření bude ovlivňovat především chemické složení dané látky a výše naznačené spektrální chování by striktně platilo pouze pro homogenní objekty - například ve smyslu jejich chemického složení. V přírodě se však nevyskytují pouze látky homogenní, ale každý objekt v krajinné sféře představuje nejrůznější kombinace látek - horninu tvoří několik minerálů, les je tvořen listnatými a jehličnatými stromy atd. To vše komplikuje průběh křivky spektrálního chování. Dalším faktorem je fyzikální stav objektů. Křivka spektrální odrazivosti se mění v závislosti na vodním obsahu objektů, teplotě objektů atd. Proto na místo křivky by bylo přesnější hovořit o „pásu“ odrazivosti. Například voda bude odrážet různé množství záření v závislosti na obsahu rozpuštěných sedimentů, v oblasti blízkého infračerveného záření bude výrazně kolísat množství odraženého záření u vegetační složky krajiny (viz obr. 2.5).

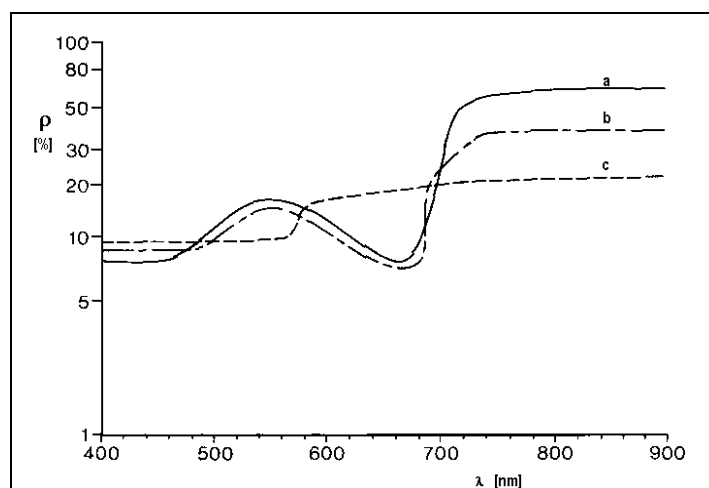


Obr. 2. Chyba! Neznámý argument přepínače. Příklad křivek spektrálního chování pro vybrané druhy povrchů

Jak se např. mění spektrální křivka odrazivosti pro vybrané druhy dřevin, je patrné z obr. 2.6. Pro každý druh je trochu jiná, stále však zachovává svůj typický průběh s lokálním maximem v zelené části viditelného spektra a s výrazným nárůstem odrazivosti v oblasti blízkého infračerveného záření. Protože lidské oko není citlivé na infračervené záření, vegetace se jeví jako zelená. Naopak na černobílých infračervených snímcích se bude vegetace jevit jako daleko světlejší ve srovnání s viditelnou částí spektra, protože odráží daleko více světla.



Obr. 2. Chyba! Neznámý argument přepínače. Odrazivost pro vybrané druhy dřevin v části viditelného a blízkého infračerveného záření (podle LILLESANDA a KIEFERA



1994)

Obr. 2. Chyba! Neznámý argument přepínače. Odrazivé vlastnosti zdravé vegetace a vegetace vystavené určitému stresu ve viditelné a blízké infračervené části spektra, a - odrazivost zdravé vegetace, b - odrazivost vegetace brzy po stresu, c - odrazivost vegetace po jisté době od stresu (podle BARRETTA a CURTISE 1976)

Z obr. 2.6 je tedy zřejmé, že spektrální chování listnatých a jehličnatých stromů je téměř identické ve viditelné části spektra, v oblasti infračervených vlnových délek jsou však jehličnaté stromy charakterizovány nižšími hodnotami odrazivosti než listnaté stromy. Budeme-li tedy řešit úkol interpretace listnatých a jehličnatých stromů, bude vhodné tento problém řešit se snímky pořízenými v infračervené části spektra, protože v této oblasti spektra budou obě třídy nejvíce odlišné. Listnaté stromy budou daleko světlejší než jehličnaté.

V případě vegetace má na spektrální křivku odrazivosti velký vliv například její zdravotní stav. Obr. 2.7 ukazuje chování vegetace zdravé a poškozené (například imisemi, mrazem apod.). U vegetace vystavené určitému stresu je porušen její růst a klesá u ní aktivita chlorofylu. Výsledkem je zvýšení odrazivosti v modré a červené viditelné části spektra a také především výrazný pokles odrazivosti v infračervené části spektra. Zvýšení odrazivosti v červené části spektra má za důsledek žloutnutí rostlin (kombinací červené a zelené barvy vznikne žlutá). Uvedeného jevu lze dobře využít při mapování zdravotního stavu vegetace, jehož změna se na snímcích často projeví dříve, než by ji bylo možné zaznamenat pouhým okem. U některých rostlin se do průběhu křivky spektrálního chování promítají např. i různé fenologické fáze - tedy množství odraženého záření se pro určité objekty mění charakteristicky s časem. Do spektrálního projevu některých rostlin se mimo jiné mohou promítat i vlastnosti půdního substrátu - např. obsah některých minerálů. Rostliny se tak mohou stát indikátorem výskytu těchto minerálů.

Sestavením křivky spektrálního chování lze pro danou látku vybrat vlnovou délku, ve které se tato látka bude na pořízeném snímku zobrazovat nejlépe a ve které se bude nejlépe odlišovat od svého okolí - od jiných látek. V případě multispektrálního snímání je obraz objektu vytvořen v několika intervalech vlnových délek. Porovnáním spektrálního chování na několika snímcích lze lépe identifikovat jednotlivé objekty. Tento přístup je podstatou dnes nejužívanějšího přístupu k automatické klasifikaci digitálního obrazu.

Z křivek spektrálního chování lze tedy určit vlnovou délku, která je vhodná k identifikaci té které látky. Jde-li nám například o zjišťování vodních objektů, bude vhodné použít snímků infračervených, protože toto záření je vodními objekty téměř úplně pohlcováno a ty se pak na snímcích jeví téměř jako téměř černé. Pokud je na druhé straně zapotřebí získat informaci o množství ve vodě rozpuštěných látek, je nutné volit materiály pořízené v modré části viditelného spektra, protože tyto vlnové délky pronikají vodním sloupcem.

2.7 Spektrální projev vybraných druhů aktivního povrchu

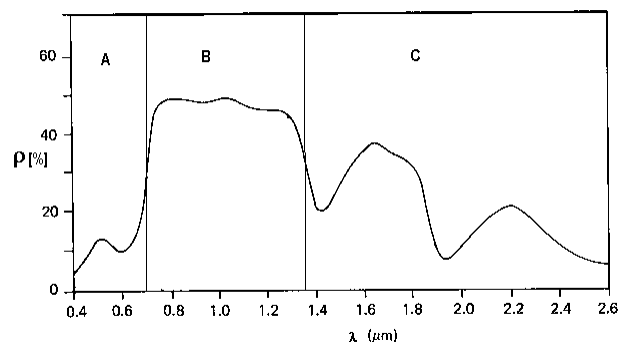
Znalost základních charakteristik chování objektů v jednotlivých částech spektra je důležitá jak pro jejich vlastní rozpoznání, tak pro odhad případně kvantifikaci některých jejich vlastností. I když detailní poznání odrazových vlastností objektů je předmětem zájmu tzv. **spektrometrie** a tyto jsou je studovány experimentálně (viz. např. VANĚČKOVÁ 1984, FRAŇKOVÁ 1986, CURRAN 1994, DANSON 1994), základní principy spektrálního chování základních druhů povrchů jsou nezbytné také pro zpracování obrazových materiálů dálkového průzkumu a zvláště s rozvojem tzv. obrazové spektrometrie nabývají na významu (viz dále).

Dále jsou uvedeny základní poznatky o spektrálním chování základních druhů povrchů, jak je uvádějí např. BARRETT a CURTIS (1976), KOLÁŘ (1990), KOLÁŘ a kol.

(1997), LILLESAND a KIEFER (1994), DANSON a PLUMMER (1996) nebo CAMPBELL (1996).

2.7.1 Spektrální projev vegetace

Vegetační složka krajiny je zastoupena téměř na všech snímcích a obrazových záznamech zemského povrchu. I když často na snímcích vytváří poměrně homogenní plochy, jejichž příkladem mohou být monokultury jehličnatého či listnatého lesa, pole s určitou zemědělskou plodinou či louky a pastviny, jde o povrchy z hlediska odrazových vlastností značně různorodé. Přesto lze povrchy pokryté vegetací z hlediska jejich spektrálního chování charakterizovat určitými společnými rysy. K charakterizování spektrálního chování vegetační složky krajiny se nejčastěji využívá odrazových vlastností listů (obr. 2.8).



Obr. 2. Chyba! Neznámý argument přepínače. Schematizovaná křivka spektrálního chování „průměrného“ listu ve viditelné a blízké infračervené části spektra, oblasti A - oblast pigmentační absorpce, B - oblast buněčné struktury, C - oblast vodní absorpce

Odrazové vlastnosti vegetačního krytu jsou formovány především následujícími faktory:

- vnější uspořádání vegetačního krytu
- vnitřní struktura jednotlivých částí rostlin
- vodní obsah
- zdravotní stav
- vlastnosti půdního substrátu

Spektrální křivka odrazivosti listu se dělí do tří hlavních částí, které odpovídají faktorům určujícím velikost spektrální odrazivosti.

A) oblast pigmentační absorpce (0,4-0,7 mikrometrů). Pro spektrální chování listů ve viditelné části spektra jsou nejdůležitější pigmentační látky - z nich především chlorofyl a karoteny. Chlorofyl pohlcuje většinu záření v modré a červené části spektra. Podle práce CAMPBELLA (1996) je v těchto intervalech spektra zeleným barvivem pohlcováno 70 % až 90 % dopadajícího záření. Tyto absorpční pásy jsou typickým znakem pásma pigmentační absorpce. Mezi nimi se nachází lokální maximum odrazivosti v zelené části spektra, které je především příčinou zelené barvy rostlin ve vegetačním období.

B) oblast buněčné struktury (0,7-1,3 mikrometrů). Pro vegetaci je typický výrazný nárůst odrazivosti ve vlnových délkách kolem 0,7 mikrometrů. Hlavní faktor, který ovlivňuje odrazivost v této části spektra je morfologické utváření listu. Protože to je

velmi proměnlivé u jednotlivých druhů rostlin, dávají obrazové materiály pořízené v této části spektra největší možnosti pro dobré odlišení jednak ploch pokrytých vegetací a ploch ostatních, ale také i jednotlivých druhů rostlin, které mohou být z hlediska svých odrazových vlastností ve viditelné části spektra velmi podobné. Více vrstev listů dává možnost opakovaného odrazu záření v infračervené části spektra, odrazivost je potom maximální při 6-8 vrstvách listů. Odrazivosti v této části spektra se často používá k charakterizování míry hustoty vegetačního krytu prostřednictvím tzv. **indexu listové pokryvnosti** (LAI - leaf area index). LAI je bezrozměrné číslo, které udává, kolikrát je plocha všech listů větší než jednotková plocha sloupce, ve kterém se listy nacházejí. Rozdílné odrazivosti vegetace ve viditelné červené (zhruba 0,6 až 0,7 mikrometrů) a blízké infračervené části spektra (kolem 0,8 mikrometrů) se využívá k výpočtu některých z řady tzv. **vegetačních indexů**. Tyto mohou být ukazatelem míry přítomnosti zelené hmoty či jejího zdravotního stavu.

C) oblast vodní absorpce (1,3-3,0 mikrometrů). Jak indikuje název, v této části spektra je spektrální odrazivost formována absorpčními pásy vody, jejichž středy lze přibližně lokalizovat na vlnových délkách 1,4 1,9 a 2, 7 mikrometrů. Lokální maxima odrazivosti se vyskytují na vlnových délkách 1,6 a 2,2 mikrometrů. V této části spektra je odrazivost přibližně nepřímo úměrná obsahu vody v listu. Změny ve vodním obsahu - tedy například vodní stres rostlin se projeví nejvíce právě v těchto vlnových délkách. Odrazivost zde závisí vedle vodního obsahu také například na tloušťce listu.

Jak uvádí KOLÁŘ (1990), obsah vody a chlorofylu v listu závisí také na složení půdy, především obsahu živin a přítomnosti některých minerálů. Spektrálních projevů rostlin může být částečně využito ke zjišťování přítomnosti některých druhů minerálů či hornin.

V oblasti mikrovln je možné zjišťovat druhy vegetace či objem biomasy především v pásmech s nižší frekvencí (s delší vlnovou délkou), u těchto dlouhých vlnových délek lze využít k detekci druhu rostlin i jiných vlastností záření - například jeho polarizace či textury, která úzce souvisí drsností daného povrchu.

Z výše uvedených faktorů ovlivňuje spektrální vlastnosti vegetačního krytu především obsah vody. Pokles vodního obsahu způsobuje vzrůst odrazivosti, mění vnitřní strukturu listu i obsah chlorofylu, což se projeví především v infračervené části spektra. Dalším faktorem modifikujícím odrazivé vlastnosti vegetace je obsah některých minerálů a některých kovů. Jak uvádí CAMPBELL (1996), nedostatek Fe či Mg se projeví ve sníženém obsahu chlorofylu a vede tedy ke změně spektrálního chování v oblasti viditelného a infračerveného záření. V oblasti viditelného záření se lokální maximum posouvá do oblasti červené části spektra, v oblasti blízkého infračerveného záření odrazivost klesá. Výsledným efektem je potom žloutnutí listů.

Jak již bylo naznačeno výše, uvedené základní vztahy popisují odrazivost „průměrného“ listu. Odrazivost od často značně heterogenního celkového vegetačního krytu je formována nejen listy ale i jinými částmi rostlin (kmeny stromů, větve, květy, plody v různém stádiu zralosti atd.). Uvedený model také výrazně modifikují rozdíly v odrazivosti osvětlených či zastíněných částí vegetačního krytu. Odrazivost celkového vegetačního krytu je nižší než hodnoty odrazivosti pro „průměrný“ list. Navíc podle práce KNIPLINGA (in CAMPBELL 1996) tento pokles odrazivosti není konstantní, ale je daleko výraznější v blízké infračervené části spektra než v oblasti viditelného záření.

2.7.2 Spektrální projev vody

Stejně jako v případě vegetační složky krajiny také voda se vyskytuje na naprosté většině obrazových materiálů DPZ. Z hlediska odrazových vlastností jsou pro vodu důležité především následující skutečnosti:

- oproti jiným materiálům či povrchům jde o látku poměrně homogenní
- může se na snímcích vyskytovat v různých skupenstvích, jejichž odrazové vlastnosti se liší
- její odrazové vlastnosti jsou odlišné od jiných běžných povrchů
- modifikuje spektrální chování všech látek v nichž je přítomna

Jak je zřejmé z obr. 2.5, voda v kapalném skupenství se vyznačuje velmi nízkou odrazivostí ve všech vlnových délkách. Sluneční záření je proniká vodním sloupcem a je ve vodě silně absorbováno. Maximální odrazivost vody (i když ve srovnání s jinými běžnými povrchy poměrně nízká) připadá na viditelnou část spektra, v infračervené části spektra odrazivost vodních objektů bez příměsí dále klesá a voda se chová téměř jako absolutně černé těleso. V případě výskytu jakýchkoliv znečišťujících látek nebo i planktonu, odrazivost vody roste. Podle KOLÁŘE (1990) je maximální propustnost vody vázána na hodnotu zhruba kolem 0,48 mikrometrů. V těchto vlnových délkách proniká záření do hloubky až 20 metrů, v intervalu 0,8-1,1 mikrometrů však pouze do hloubky asi 10 cm. Krátkovlnné záření lze tedy použít ke zjišťování informací o dnu mělkých nádrží. Na infračervených snímcích se naopak vodní povrchy často jeví jako nejtmaší a těchto materiálů lze využít k lokalizaci vodních objektů. Vlastnosti vodních objektů (vodního sloupce) se určují ve viditelném oboru spektra - především v oblasti jeho nejkratších vlnových délek (modré světlo). Růst obsahu chlorofylu se projeví poklesem odrazivosti v modré části spektra a vzrůstem v části zelené. Změny v koncentraci O₂, změny v pH nebo koncentrace solí ve vodě se přímo neprojevují ve změnách spektrálního chování vodních objektů, velmi často však korelují s jinými jevy, které mají vliv na množství odraženého či emitovaného záření.

Z množství emitovaného dlouhovlnného záření je možné zjišťovat **radiální teplotu** vodních ploch, a to poměrně přesně (desetiny stupně Celsia), radiální teplota je však odlišná od teploty měřené klasickým způsobem. V oblasti mikrovln jsou odrazové vlastnosti vodních objektů výrazně závislé například na drsnosti povrchu - ve spektrálním chování vodních objektů se výrazně uplatňuje vlnění či znečišťující látky.

Odlišné spektrální chování vykazuje voda v tuhém skupenství. Sníh a led mají ve viditelné a blízké infračervené části spektra vysokou odrazivost. Na rozdíl od vody v kapalném stavu převyšuje odrazivost čerstvě napadlého sněhu odrazivost ostatních povrchů. Podobně vysokou odrazivost mají horní vrstvy oblačnosti, tvořené ledovými krystalky. Odrazivost ledu a sněhu je velmi podobná do vlnové délky 1,1 mikrometrů. Odlišení obou povrchů lze jednoznačně provést v delších vlnových délkách - ve středním infračerveném pásmu (KOLÁŘ 1990). Zde je odrazivost sněhu významně nižší než odrazivost oblačnosti.

V oblasti termálního záření je odrazivost sněhu a oblačnosti opět velmi podobná. Množství odraženého záření od sněhové pokrývky ovlivňují kromě výše uvedených faktorů dále především její stáří, vodní hodnota sněhu, obsah prachových příměsí a také velikost sněhových vloček. V oblasti mikrovln mají voda v kapalném skupenství a led velmi odlišné dielektrické vlastnosti, což umožňuje jejich rozlišení a například

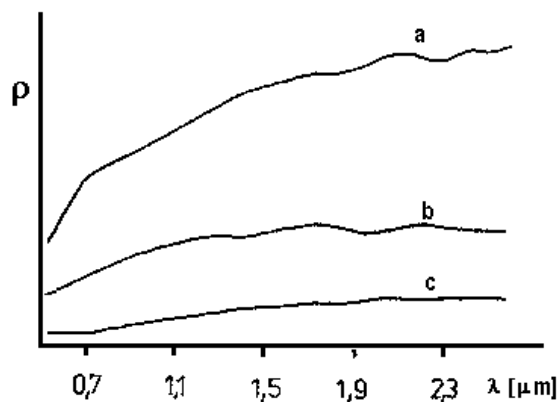
monitorování procesu tání sněhu a ledu. Radar pracující v X-pásmu umožňuje rozlišit druh a stáří ledu či jeho mocnost.

2.7.3 Spektrální projev půd

Půda je komplexem biotických a abiotických součástí, a tudíž z hlediska spektrálních vlastností povrchem značně heterogenním. Spektrální projev anorganického materiálu je jednodušší než u vegetace. Anorganické látky se obecně vyznačují pozvolným vzestupem odrazivosti se vzrůstající vlnovou délkou. Odchylky od tohoto obecného schématu jsou způsobeny chemickým složením, mechanickými vlastnostmi a také strukturou povrchu. Spektrální vlastnosti půd formují především následující faktory:

- minerální složení
- půdní vlhkost
- obsah organických látek
- textura (drsnost) půdního povrchu

Zatímco obsah organických látek má vliv na odrazové vlastnosti půd především v kratších vlnových délkách, jak uvádí BARRETT a CURTIS (1976) zhruba do 1,8 mikrometrů, drsnost povrchu ovlivňuje spektrální chování půd především v oblasti mikrovln (viz kapitola 5). Protože v křivkách odrazivosti jednotlivých minerálů se projevují různé absorpční pásy, výsledná křivka spektrální odrazivosti půdy je primárně formována nejprve superpozicí křivek jednotlivých minerálů a dále je modifikována faktory dynamickými - především vlhkostí půdy či drsnost povrchu, která se může měnit například vlivem agrotechnických zásahů.



Obr. 2. Chyba! Neznámý argument přepínače. Schematizované spektrální chování písčité půdy (a), jílovité půdy (b) a spraší (c) v blízké infračervené části spektra (KOLÁŘ 1990)



Obr. 2. Chyba! Neznámý argument přepínače. Schematizované spektrální chování různě vlhké prachovité hlíny (plná čára) a jílu (čárkovaná čára) v části viditelného a blízkého infračerveného elektromagnetického spektra (převzato z práce KOLÁŘE 1990 podle SWAIN a DAVIS 1978)

Obecně se celková odrazivost půd zvyšuje s narůstající velikostí půdních částic pro daný typ půdy (obr. 2.9). Za vhodných podmínek se do drsnosti půdního povrchu promítají i takové vlastnosti jako stupeň erozních procesů apod.

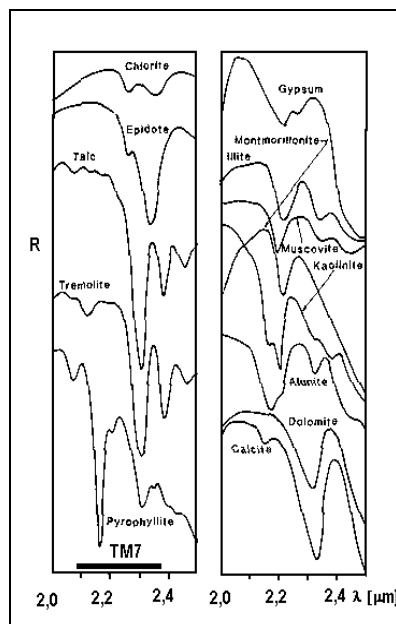
Vyšší vlhkost půdy způsobuje obecně její sníženou odrazivost s patrnými absorpčními pásy (obr. 2.10). Absorpční pásy jsou vázány především na vlnové délky 1,4 a 1,9 mikrometrů (BARRETT a CURTIS 1976). Obsah půdní vláhy často silně koreluje s texturou půdy. Hrubé písčité půdy jsou obvykle dobře drénovány, což má za následek nízký obsah půdní vláhy a tedy vyšší odrazivost. Špatně odvodňované půdy s jemnozrnnou strukturou budou mít obecně nižší odrazivost. Jílovité půdy tedy budou obecně tmavší než půdy písčité. Avšak v případě absence vody bude půda jevit opačnou tendenci - hrubozrnné půdy se budou jevit jako tmavší než jemnozrnné.

Minerální složení se projevuje v charakteristickém zabarvení půdy. V oblasti termálního záření je množství emitovaného záření poměrně vysoké a konstantní s absorpčními pásy např. kolem 9 mikrometrů. Množství odraženého či emitovaného dlouhovlnného záření v oblasti mikrovln je ovlivňováno především vlhkostí a drsností povrchu.

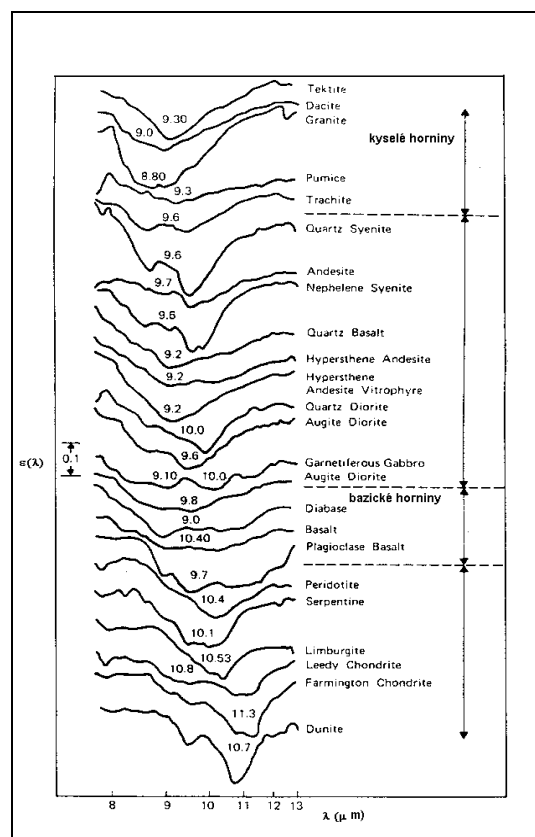
2.7.4 Spektrální projev hornin a minerálů

Oproti půdám představují horniny a především minerály z hlediska jejich chemického složení objekty do značné míry homogenní. Spektrální projev hornin není tak jednoznačný jak u jednotlivých minerálů. V případě jednotlivých minerálů lze v jejich křivkách spektrálního chování poměrně přesně lokalizovat absorpční pásy způsobené jednotlivými chemickými prvky či sloučeninami. Výsledný tvar spektrální křivky odrazivosti hornin tedy ovlivňují hlavně absorpční pásy ve spektru minerálů a jejich rozmístění je dáno chemickým složením a krystalickou stavbou. Vzhledem k poměrně hrubému spektrálnímu rozlišení běžných obrazových materiálů (viz dále) je přesná lokalizace jednotlivých absorpčních pásů a tedy identifikace hornin či minerálů často problematická. Tuto skutečnost dokumentuje i obr. 2.11, v němž je naznačeno spektrální rozlišení pásma TM-7 z družice LANDSAT. Chemické složení určuje spektrální chování hornin ve viditelném a infračerveném oboru spektra. Přítomnost vody v minerálech se projevuje opět výskytem absorpčních pásů ve vlnových délkách 1,4 a 1,9 mikrometrů.

Vhodnými oblastmi spektra, ve kterých lze do jisté míry jednoznačně charakterizovat odrazové vlastnosti jednotlivých hornin a především minerálů, jsou střední infračervené vlnové délky a také oblast termálního záření (obr. 2.12).



Obr. 2. Chyba! Neznámý argument přepínače. Laboratorně určená spektra vybraných minerálů. Spektra jednotlivých minerálů jsou v relativních hodnotách a jsou vertikálně posunuta. TM-7 označuje interval vlnových délek snímaných sedmým pásmem skeneru THEMATIC MAPPER umístěného na družicích LANDSAT (upraveno podle LILLESANDA a KIEFERA 1994)



Obr. 2. Chyba! Neznámý argument přepínače. Spektrální chování vybraných druhů hornin v termální části elektromagnetického spektra. Spektra jednotlivých hornin jsou v relativních hodnotách a jsou vertikálně posunuta. $\epsilon(\lambda)$ - spektrální emisivita (upraveno podle BARRETTA a CURTISE 1976)

2.8 Spektrální příznaky

Studium množství odraženého či emitovaného záření v určitých vlnových délkách umožňuje poznat spektrální chování objektů. Z něho lze jednak rozpoznat jednotlivé objekty či jevy, jednak rozpoznat jejich specifické vlastnosti. Umožňuje navíc posoudit, ve kterých vlnových délkách jsou různé objekty spektrálně odlišné - separovatelné. Stupeň separace tedy závisí na oblasti vlnových délek, ve kterých objekty studujeme. Například voda a vegetace jsou dobře rozlišitelné v blízké infračervené části spektra. Ze spektrálního chování tedy lze pro každý objekt odvodit tzv. **spektrální příznaky**. Tyto příznaky jsou pro daný typ povrchů typické, nejsou však jedinečné. Proměnlivost spektrálních příznaků je způsobena prostorovou a časovou proměnlivostí spektrálního chování objektů. Jednotlivé spektrální příznaky definují osy vícerozměrného prostoru, který nazýváme **příznakový prostor**. Definování spektrálních příznaků a jejich poloha v příznakovém prostoru jsou důležitým krokem při automatickém rozpoznávání objektů na snímcích.

3. Systém pořizování dat distančními metodami

V dálkovém průzkumu Země je nejčastěji měřena intenzita odraženého nebo emitovaného elektromagnetického záření. Z jejího množství či jiných charakteristik lze potom usuzovat na typ objektu či jevu, anebo na některé jeho vlastnosti. V současnosti existují dva základní způsoby, jak toto záření měřit - tyto způsoby se často označují jako konvenční a nekonvenční.

Konvenční (klasické) metody jsou založeny na tom, že exponováním filmu ve **fotografické komoře** dochází na citlivé vrstvě fotografického papíru k chemické reakci, která odpovídá množství záření, které na tuto vrstvu dopadlo. Intenzita zčernání citlivé vrstvy filmu je přímo úměrná množství dopadajícího záření. Jevy a objekty, které odrážejí velké množství elektromagnetického záření, způsobí značné zčernání negativu a na pozitivním snímku se potom jeví jako velmi světlé. Takto vzniklý obraz studovaného území nazýváme **fotografie**, a ta tedy vzniká najednou, tzv. centrální projekcí a je nejčastěji vykopírována na fotografický papír - existuje tedy v analogové podobě. Tímto způsobem lze zaznamenávat elektromagnetickou energii v poměrně úzkém intervalu vlnových délek - přibližně od 0,3 do 0,9 mikrometrů - tedy v oboru viditelného a části blízkého infračerveného záření. Protože klasickým fotografickým metodám byla v naší i cizojazyčné literatuře věnována poměrně značná pozornost, následující text přináší přehled o metodách nekonvenčních. Zájemce o fotografické metody snímání lze odkázat například na práce MURDYCHA (1976), JEŘÁBKA (1982), ČAPKA (1988), LILLESANDA a KIEFERA (1994) či CAMPBELLA (1996).

Mezi nekonvenční metody snímání lze zařadit tzv. televizní systémy, potom především systémy snímacích rozkladových zařízení, vytvářející obraz po jednotlivých řádcích orientovaných rovnoběžně (podélné snímání) a nebo kolmo (příčné snímání) k dráze letu nosiče. K nekonvenčním metodám můžeme zařadit v poslední době se rozvíjející postupy tzv. digitální fotografie. Vesměs jde o metody pasívní, aktivním metodám využívajícím vlastního zdroje energie mikrovlnného záření je věnována samostatná kapitola, a to jak vzhledem ke specifickým vlastnostem tohoto záření, tak ke specifikám fungování aktivních systémů.

3.1 *Nekonvenční způsoby zobrazování zemského povrchu*

Podle LILLESANDA a KIEFERA (1994) se nekonvenční metody od metod klasických (fotografických) liší především v následujících bodech:

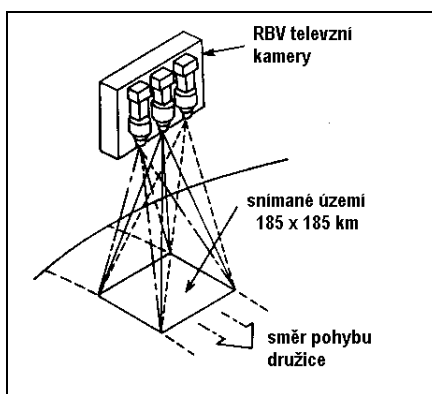
- 1) Odlišná technika vytváření obrazu - obraz není vytvářen v jednom okamžiku tzv. centrální projekcí ale postupně, v dynamickém režimu po jednotlivých obrazových prvcích (pixelech)
- 2) Velké spektrální rozlišení. Zatímco v případě fotografických metod lze vytvářet obraz v intervalu vlnových délek zhruba 0,3 až 0,9 mikrometrů, rozkladovým zařízením lze využít daleko širšího intervalu vlnových délek - od 0,3 do 14 mikrometrů.
- 3) Omezené prostorové rozlišení. Na letecké fotografii je možno zachytit detail nerozeznatelný pouhým okem, v případě obrazových záznamů, zvláště družicových, se rozměr nejmenšího prvku pohybuje většinou v intervalu od jednotek metrů do několika desítek či stovek metrů.

- 4) V případě multispektrálního snímání vzniká většinou každý snímek jiným optickým systémem, což přináší problém „slícování“ jednotlivých spektrálních výtažků při vytváření multispektrálních syntéz. Skener používá jednoho optického systému pro registraci všech pásem. Registrace však probíhá v dynamickém režimu, což má za důsledek vznik specifických geometrických zkreslení.
- 5) Vznik fotografického obrazu je vázán na fotochemické reakce probíhající na citlivé vrstvě filmu. Množství odraženého záření, které způsobuje tyto reakce, lze velmi těžko kalibrovat a porovnávat na různých fotografiích. Obrazové záznamy vzniklé nekonvenčními metodami jsou zaznamenávány elektronicky, v číslicové podobě a jednotlivá měření lze poměrně snadno kalibrovat a porovnávat mezi sebou
- 6) Registrace obrazových záznamů v digitální (číslíkové) podobě umožňuje automatizovat některé kroky jejich zpracování a kombinaci s jinými digitálními daty v GIS.

3.1.1 Televizní systémy

Televizní systémy představují přechodný způsob snímání zemského povrchu mezi klasickými fotografiemi a snímacími rozkladovými zařízeními. Pracovaly ve viditelném a infračerveném oboru spektra. Obraz byl objektivem promítán na stínítko katodové trubice a odtud byl snímán v paralelních řádcích. Na Zemi byl záznam vysílán buďto okamžitě pomocí televizního přenosového signálu, nebo se zaznamenával na magnetické médium. V přijímací stanici se obrazový záznam buďto fotografoval z obrazovky, nebo se z magnetického média zobrazoval za pomoci výpočetní techniky.

Kvalita obrazu byla degradována jeho rozkladem do jednotlivých řádek a také kvalitou přenosu. Rozlišovací schopnost kolísala v závislosti na druhu zařízení a výšce snímání od 40 m do několika km.



Obr. 3. Chyba! Neznámý argument přepínače. Schéma televizního systému RBV družic LANDSAT 1 a 2

Televizního systému využívaly ke snímání zemského povrchu první meteorologické družice TIROS (MORAIN a BAROS 1997). Vedle klasických televizních systémů lze využívat i videokamer nebo tzv. vidikonových kamer se zpětným paprskem. Jejich zástupcem byl systém RBV (Return Beam Vidicon). Šlo o komoru vybavenou kvalitním objektivem a filtrem. Obraz vznikl na citlivé desce. Odtud byl snímán elektronickým paprskem. Paprsek nesl obrazovou informaci, která byla dále upravována a zpracována. Tyto systémy měly obvykle vysokou rozlišovací schopnost a byly konstruovány jako multispektrální. Systém RBV fungoval na prvních třech družicích ERTS (LANDSAT). Na družicích LANDSAT 1 a 2 byl systém 3 kamer (2 ve viditelném oboru spektra, 1

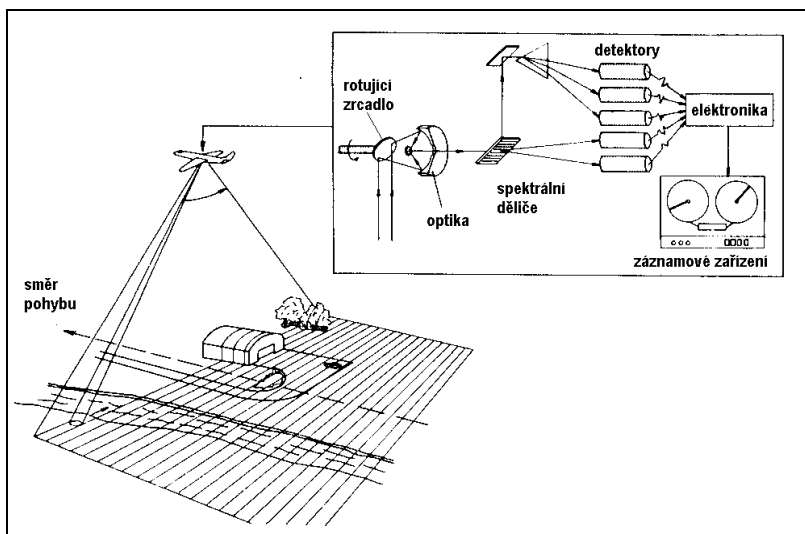
v infračerveném), snímal se obraz široký 185 km., na LANDSAT 3 byly dvě kamery pracující ve viditelném oboru spektra. Prostorová rozlišovací schopnost byla u snímků z LANDSAT 1 a 2 kolem 80 metrů, u LANDSAT 3 kolem 24 metrů v tzv. panchromatickém módu. Obraz se skládal z jednotlivých obrazových prvků - pixelů. Snímky se překrývaly zhruba o 10 procent. Měřítko originálního obrazu se pohybovalo kolem 1:7,25 mil. (LILLESAND a KIEFER 1994). Vedle družice LANDSAT byly televizní systémy umístěny například také na sovětských družicích METEOR, přístroje nesly označení MSU (LEGG 1994).

3.1.2 Snímací rozkladová zařízení

V současné době existují dva základní druhy snímacích rozkladových zařízení, kterými lze vytvářet obrazový záznam zemského povrchu. První, starší typ, je představován tzv. mechanooptickým skenerem, jehož schéma je na obr. 3.2. Druhý, novější typ, představuje tzv. elektrooptický skener (obr. 3.3). Základní součástí obou typů je měřicí prvek - přístroj na měření množství odraženého nebo emitovaného elektromagnetického záření - **radiometr**. Radiometr měří radiaci z určité elementární plochy zemského povrchu v určitém intervalu spektra. Velikost této plochy je dána jednak technickými parametry snímacího zařízení, jednak konfigurací celého systému - především výškou letu nosiče. I když se snímacích rozkladových zařízení využívá především na družicových nosičích, naprostá většina těchto družicových systémů má své analogy na nosičích letadlových, na kterých se každé zařízení testuje v experimentální fázi před vlastním vypuštěním družice. Z rozdílné výšky letu obou druhů nosičů vyplývají i rozdílné vlastnosti vytvořených obrazových záznamů.

Téměř všechny systémy dnes pracují jako **multispektrální** - tedy vytvářejí několik obrazových záznamů snímaného území v několika intervalech spektra. Systémy pracující v několika stovkách úzce vymezených spektrálních intervalů se nazývají **hyperspektrální** a jsou využívány tzv. **obrazovou spektrometrií**.

3.1.2.1 Mechanooptický skener



Obr. 3. Chyba! Neznámý argument přepínače. Princip příčného skenování (mechanooptické snímací rozkladové zařízení), podle LILLESANDA a KIEFERA (1994)

Mechanooptické snímací rozkladové zařízení pomocí rovinného rotujícího nebo oscilujícího zrcadla zaznamenává radiaci z jednotlivých elementárních plošek v úzkém pruhu území, kolmém ke směru letu nosiče. Přes systém zrcadel je dopadající záření směřováno nejprve na tzv. spektrální děliče, které dopadající záření dělí do jednotlivých intervalů - tzv. pásem. Takovýmto spektrálním děličem může být například optický hranol. Takto rozdělené záření potom dopadá na detektor citlivý k danému intervalu vlnových délek. Detektor převádí množství dopadajícího záření na elektrický signál, který je po zesílení zaznamenán na záznamové médium. Rychlost rotace zrcadla a rychlost pohybu nosiče jsou synchronizovány tak, aby jednotlivé snímané elementární plošky na sebe v řádku navazovaly a aby na sebe bezprostředně navazovaly také následující řádky. Šířka snímaného území je dána jednak tzv. obrazovým úhlem, který se většinou pohybuje od 90 do 120 stupňů, jednak potom výškou letu nosiče. V případě letadlových nosičů se šířka snímaného území může pohybovat řádově v desítkách metrů, v případě družicových systémů je jedním přeletem zaznamenáváno území v pruhu širokém až několik tisíc kilometrů. Příkladem tohoto typu jsou skenery MSS a TM na družicích LANDSAT.

V současné době používané detektory radiometrů lze rozdělit do dvou skupin. První tvoří **detektory tepelné**, u kterých je množství dopadající energie přímo úměrné změně teploty čidla. Druhou skupinu tvoří **detektory fotonové**, které zaznamenávají intenzitu dopadajících fotonů na povrch polovodiče. Fotonové detektory rychleji reagují na změny množství dopadající radiace a jsou tudíž z radiometrického hlediska přesnější.

Analogový (kontinuální) signál dopadající na čidlo detektoru je převáděn na signál diskrétní - do číslicové podoby (viz. obr. 3.8). V každém časovém okamžiku systém měří radiální charakteristiku jako průměrný příspěvek všech povrchů na určité elementární ploše. Její velikost je definována tzv. zorným polem radiometru a úzce souvisí s prostorovým rozlišením výsledného obrazového záznamu. Čím je zorné pole radiometru menší, tím lepší je prostorová rozlišovací schopnost výsledného obrazu.

Každý detektor je charakterizován určitým prahem citlivosti - to je určitým minimálním množstvím radiace, která ještě může být zaznamenána a zároveň odlišena od tzv. šumu. Šum je částí zaznamenaného signálu, která nenesou potřebnou informaci o snímaných objektech a která vzniká často náhodně v důsledku nedokonalosti celého měřicího systému. Poměr zaznamenaného signálu a šumu je používán jako míra kvality snímacího zařízení. Čím větší je zorné pole radiometru, tím více energie z elementární plochy obrazu je měřeno a tím vyšší je poměr signálu a šumu.

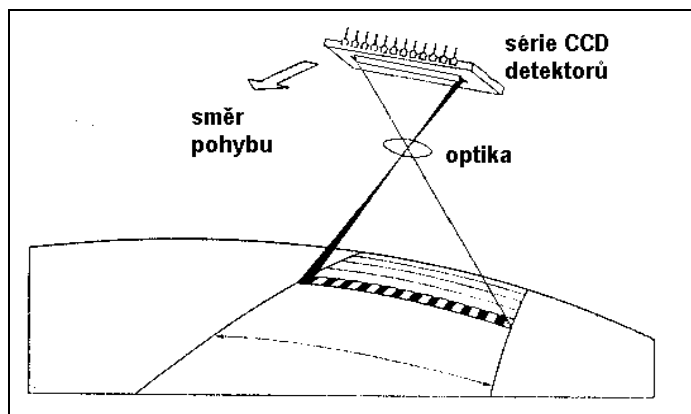
Při konstantní velikosti zorného pole radiometru lze větší množství radiace z elementární plochy snímaného území získat rozšířením zaznamenávaného intervalu vlnových délek elektromagnetického záření. Tím je však degradováno tzv. spektrální rozlišení výsledného obrazu.

Výsledkem práce snímacího rozkladového zařízení je digitální obrazový záznam, který má obecně podobu matice dat o určitém počtu řádků a sloupců. Daný řádek a sloupec definují jeden **obrazový prvek (pixel)**. Ten má určitý rozměr zhruba odpovídající prostorovému rozlišení výsledného obrazového záznamu. Každý pixel nese jedno číslo (tzv. DN - digital number), které představuje radiometrickou charakteristiku snímaného povrchu - nejčastěji tedy průměrné množství odraženého nebo emitovaného záření z plochy daného obrazového prvku. Výstupní signál je zaznamenáván v určitém počtu úrovních - v tzv. **dynamickém rozsahu**. Obrazová data zaznamenaná v 256 úrovních se

označují jako 8-bitová. Mohou však být zaznamenávána v 64 či až 1024 hodnotách. Tento počet úrovní definuje tzv. radiometrickou rozlišovací schopnost (viz. dále).

3.1.2.2 Elektrooptický skener

Skenery elektrooptické, někdy označované jako stírací, vytvářejí obraz území tzv. podélným snímáním. Na místo mechanického zařízení se používá řádkového pole detektorů (označovaných jako CCD), které je umístěno v ohniskové rovině optiky. Jednotlivé detektory jsou velmi malých rozměrů (řádově jednotky mikrometrů) a v jedné řádce jich může být i více než 10 000. Každý detektor registruje záření z plochy jednoho pixelu. V zorném poli přístroje je neustále celá řádka, spojitě postupující ve směru letu. Tento druh skeneru má mnoho výhod oproti předcházejícímu. Jak uvádí KOLÁŘ a kol. (1997), skener je schopen zachytit daleko silnější signál z plochy jednoho obrazového prvku (má vyšší poměr signál/šum) a signál může být vyjádřen v daleko více úrovních. To umožňuje lepší radiometrickou i geometrickou rozlišovací schopnost. Protože nemá mechanickou část, je také daleko spolehlivější. Jednou z nevýhod je nutnost kalibrovat veliké množství detektorů a také jeho menší spektrální rozlišovací schopnost - může pracovat jen ve viditelném a blízkém infračerveném oboru spektra. Příkladem tohoto typu skeneru je především zařízení HRV na družicích SPOT, skenery na družicích IRS nebo německý systém MOMS.



Obr. 3. Chyba! Neznámý argument přepínače. Princip podélného způsobu skenování (optoelektronické snímací rozkladové zařízení), podle LEGGA (1994)

3.1.2.3 Digitální fotografie

V poslední době prodělávají velký rozvoj tzv. digitální fotoaparáty, které pracují na stejném principu jako optoelektronický skener. Snímací zařízení je vybaveno kvalitní optikou, přes kterou je záření směřováno na matici CCD detektorů. Snímek tedy sice vzniká rozkladem po částech zaznamenáním radiometrické charakteristiky každým z detektorů, nevzniká však postupně jako v případě skeneru, ale v jednom okamžiku. Celkový počet na světlo citlivých buněk v matici detektorů může dosahovat až 1 milion a na tomto počtu přímo závisí rozlišení výsledného snímku. Toto rozlišení se v současné době pohybuje v hodnotách např. 800 x 600 bodů či 1024 x 768 bodů a je hlavním omezujícím faktorem významnějšího použití digitální fotografie v aplikacích dálkového průzkumu Země.

3.1.3 Zobrazující a nezobrazující zařízení

Nekonvenčními metodami snímání nemusí vznikat pouze obrazové záznamy území. Vedle zobrazujících radiometrů (skenerů) existují i tzv. **nezobrazující** (např. tzv. profilové) radiometry, výsledkem jejichž měření jsou změny intenzity reflektovaného či emitovaného záření podél určitého profilu (linie). Na družicích jsou v současné době vedle pasivních systémů - snímacích rozkladových zařízení - umísťována také zařízení aktivní.

Aktivními systémy vznikají digitální záznamy na stejném principu. Neměří však reflektované záření Slunce nebo emitované záření zemského povrchu, ale samy dodávají zdroj energie a údaje o měřených objektech jsou zakódovány v rozdílných charakteristikách vyslaného a přijatého záření. Také tato aktivní zařízení lze dělit na zobrazující a nezobrazující. V případě nezobrazujících zařízení lze získat i velmi specifické informace jako například výšková měření pomocí tzv. **výškoměrů (altimetrů)** nebo měření směru větru pomocí tzv. **rozptyloměrů (skaterometrů)** (blíže viz kapitola 5).

3.1.4 Geometrické vlastnosti skenovaného obrazového záznamu

Zcela jiný způsob vytváření obrazu snímacím rozkladovým zařízením oproti letecké fotografii vnáší do výsledného obrazu také jiná geometrická zkreslení. Obrazový záznam vzniklý podélným skenováním má blíže k letecké fotografii. Na druhé straně družice jako nosič zobrazujícího zařízení je daleko více stabilní než letadlové nosiče a daleko méně podléhá vnějším vlivům, které způsobují geometrické nepřesnosti. Proto například v případě meteorologických družic s malým prostorovým rozlišením k základní geometrické korekci obrazu často postačují pouze parametry dráhy družice.

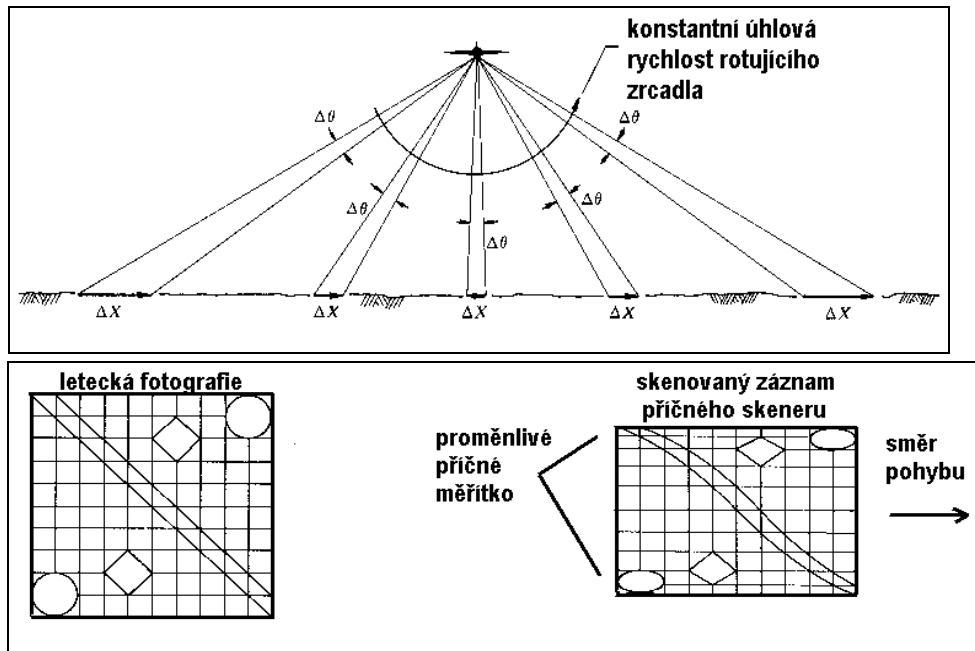
Geometrická zkreslení obrazového záznamu jsou minimální v blízkosti linie letu a směrem k okrajům obrazu narůstají. Některé nepřesnosti v geometrických vlastnostech družicových obrazových záznamů jsou nepodstatné také díky poměrně značné vzdálenosti nosiče od zemského povrchu. S výškou letu nosiče úzce souvisí rozměr obrazového prvku definujícího prostorové rozlišení obrazového záznamu. Podobně jako v případě letecké fotografie, kdy chyby v geometrii snímku jsou minimalizovány v jeho subsatelitním bodě, v případě obrazového záznamu vzniklého příčným snímáním jsou chyby v geometrii většinou zanedbatelné podél čáry definované jednotlivými subsatelitními body. Základní specifika, kterými se vyznačuje geometrie skenovaného obrazového záznamu vzniklého příčným skenováním, jsou podle práce LILLESANDA a KIEFERA (1994) následující:

- tzv. tangenciální změny měřítka
- kolísání velikosti obrazového prvku
- relativní změny v poloze objektů v důsledku jejich různé výšky

3.1.4.1 Tangenciální změny měřítka

Obrazové záznamy z mechanooptického skeneru vykazují především změny měřítka obrazových prvků ve směru kolmém na pohyb nosiče - tzv. **tangenciální změny měřítka**. Princip tohoto jevu je zobrazen na obr. 3.4a. V důsledku konstantní úhlové rychlosti rotujícího nebo oscilujícího zrcadla se s rostoucí vzdáleností od čáry nadiru mění rozměr obrazového prvku ve směru kolmém na pohyb nosiče. Protože rozměr pixelu v podélném směru se nemění, výsledkem mohou být změny tvarů některých objektů v obraze (Obr. 3.4.b). Uvedené distorze jsou typické především pro příčné

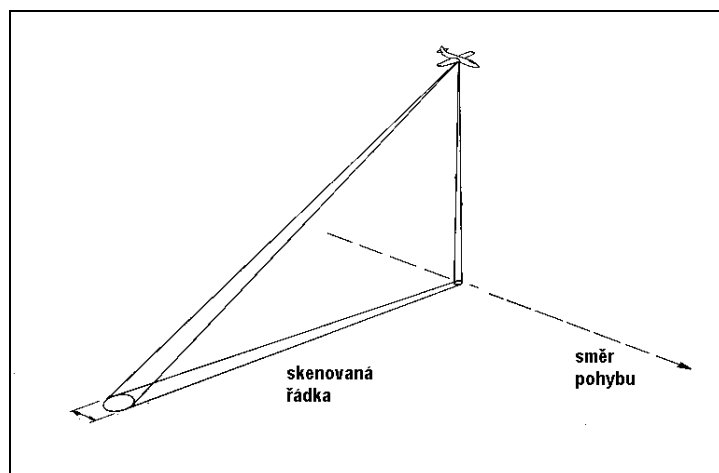
skanované obrazové záznamy, pořízené z malých výšek - především z letadel např. při termovizním snímání. S rostoucí výškou letu vlivy tangenciálních změn měřítka zmenšují a u obrazových záznamů z družic je lze zanedbat (ROBINSON et al. 1995).



Obr. 3. Chyba! Neznámý argument přepínače. Zdroj (a) a důsledky (b) tangenciální změny měřítka obrazového záznamu pořízeného příčným skenováním, upraveno podle LILLESANDA a KIEFERA (1994)

3.1.4.2 Kolísání velikosti obrazového prvku

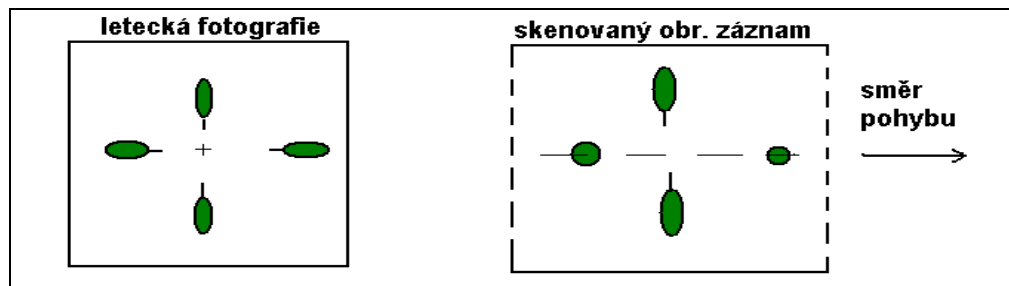
Jak je patrné z obr. 3.5, se zvětšující se vzdáleností od čáry nadiru roste velikost plochy, která je v daném okamžiku v zorném poli radiometru a tím klesá prostorová rozlišovací schopnost obrazového záznamu.



Obr. 3. Chyba! Neznámý argument přepínače. Princip kolísání velikosti obrazového prvku příčně skanovaného obrazového záznamu, podle LILLESANDA a KIEFERA (1994)

3.1.4.3 Poziční chyby v poloze objektů v důsledku jejich různé výšky

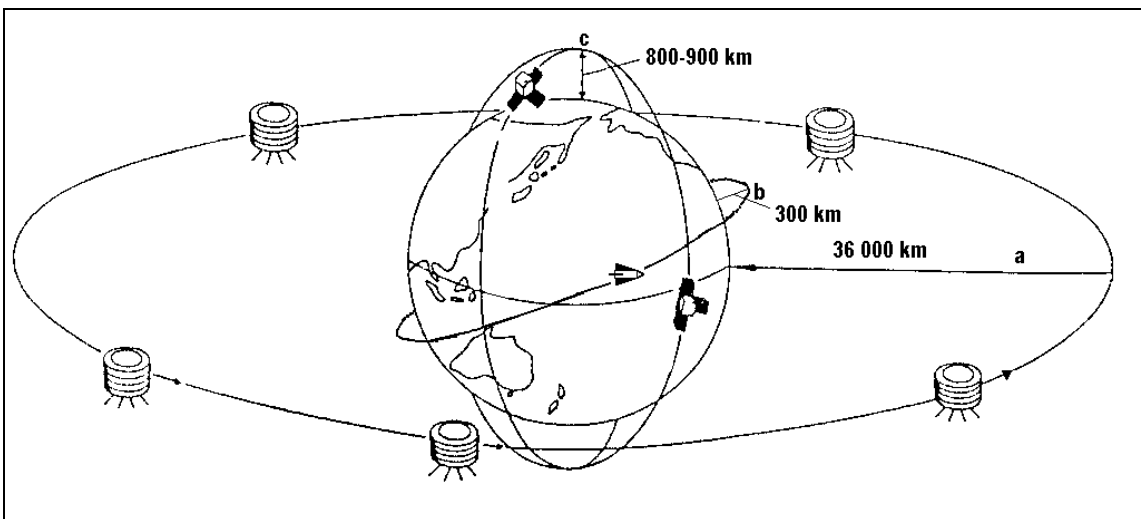
Nacházejí-li se na snímaném území objekty s vertikálním rozměrem, potom na letecké fotografii se tyto objekty zdánlivě „naklánějí“ od středu snímku k jeho okrajům. Jejich pata je zobrazena blíže nadiru než jejich vrchol, podléhají tzv. radiálnímu posunu (též. tzv. paralaktická chyba). Protože obrazové záznamy vznikají v dynamickém režimu, výše uvedený efekt je na obrazových záznamech ze skeneru modifikován tak, že uvedené objekty se budou naklánět ve směru kolmém na čaru nadiru, jak je znázorněno na obr. 3.6. Stejně jako v případě radiálního posunu u letecké fotografie lze uvedených změn v poloze objektů využít k měření tzv. paralaxy, zjišťování výškových poměrů a sestavování modelu terénu snímaného území.



Obr. 3. Chyba! Neznámý argument přepínače. Porovnání efektu relativní změny v poloze objektů na letecké fotografii (a) a skenovaném záznamu (b)

3.2 Družicové systémy

Umělé družice Země a pilotované kosmické lodě a laboratoře tvoří v současné době nejdynamičtěji se vyvíjející skupinu nosičů pro pořizování dat. Jejich role postupně narůstá již od počátku 60. let, kdy byla vypuštěna první meteorologická družice TIROS-1 (LINTZ, SIMONETT 1976). Většina družic pořizuje obrazová i neobrazová data metodami dálkového průzkumu již delší dobu a nejedná se pouze o jednu družici, ale o družic několik, které mají z hlediska kompatibility pořizovaných obrazových záznamů, z hlediska technických parametrů nosiče i z hlediska parametrů snímacího zařízení podobné vlastnosti. Tyto jsou pak označovány jako **družicové systémy**. Základní vlastností, která ovlivňuje většinu dalších parametrů systému je oběžná dráha družice. Družice používané pro DPZ obíhají kolem Země po eliptických drahách v různých výškách a podle polohy dráhy k rovině rovníku se rozeznávají tři základní typy oběžných drah (obr. 3.7).



Obr. 3. Chyba! Neznámý argument přepínače. Základní typy oběžných drah družic. a - rovníková, b - šikmá, c - subpolární

Tyto dráhy jsou označovány jako **rovníkové**, **šikmé** a **subpolární** a jejich stručná charakteristika je podána dále.

3.2.1 Rovníková oběžná dráha

Družice obíhá kolem Země v rovině rovníku a to v takové vzdálenosti od zemského povrchu, ve které je doba oběhu družice rovna době rotace Země kolem vlastní osy. Družice obíhá ve výšce přibližně 36 000 km od západu k východu a pro pozorovatele na Zemi se tedy nachází na stále stejném místě. Tato dráha se označuje jako **geostacionární**. Družice na takovéto dráze může pořizovat obrazové záznamy zemského povrchu s poměrně malým prostorovým rozlišením, avšak velice často. Slouží tedy především k monitorování synoptických procesů v meteorologii.

3.2.2 Šikmá oběžná dráha

Šikmá oběžná dráha svírá s rovinou rovníku úhel 30 až 65 stupňů. Díky tomu družice není schopna poskytovat obraz území ve vyšších zeměpisných šířkách. Po této dráze se většinou pohybují kosmické lodě s lidskou posádkou, tedy nosiče, které nejsou určeny k regulárnímu pořizování dat metodami dálkového průzkumu. Družice obíhají po nižších oběžných drahách (několik stovek km).

3.2.3 Subpolární oběžná dráha

Družice na subpolární dráze se pohybuje přibližně ve směru poledníků. S rovinou rovníku svírá obvykle úhel 80-100 stupňů označovaný jako inklinace. Družice se pohybuje ve výškách 700 až 1000 km. Doba oběhu v závislosti na výšce letu je přibližně 2 hodiny. Za den vykoná družice 12 až 15 oběhů. Dráha je volena tak, že družice zaujímá vždy stále stejnou polohu ke Slunci a nad daným místem se nachází vždy ve stejné hodině místního času, je označována také jako dráha synchronní se Sluncem.. Na denní osvětlené straně obíhá od severu k jihu.

V závislosti na parametrech dráhy družice, především na výšce dráhy lze v současné době z družic získat obrazová data globální i lokální, Mohou tedy zobrazovat téměř celý zemský disk v přibližném měřítku 1 : 10 mil., ale i obrazové záznamy v přibližném měřítku 1: 25 tis., poskytující prostorové rozlišení několika metrů.

Podle zaměření lze družicové systémy rozdělit do dvou hlavních skupin:

- družice meteorologické (např. METEOSAT, GOES, NIMBUS, NOAA)
- družice pro výzkum přírodních zdrojů (např. LANDSAT, SPOT, IRS)

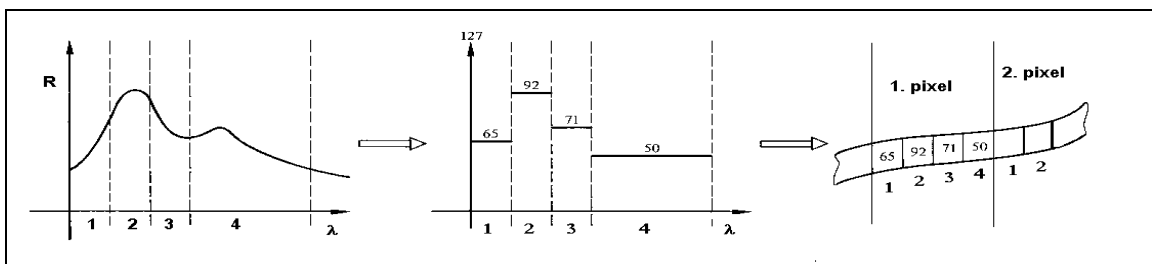
Meteorologické družice tvoří opět dvě velké skupiny podle typu oběžné dráhy, a to:

- meteorologické družice na polárních drahách (např. NOAA)
- meteorologické družice geostacionární (např. METEOSAT)

3.3 Základní charakteristika digitálního obrazového záznamu

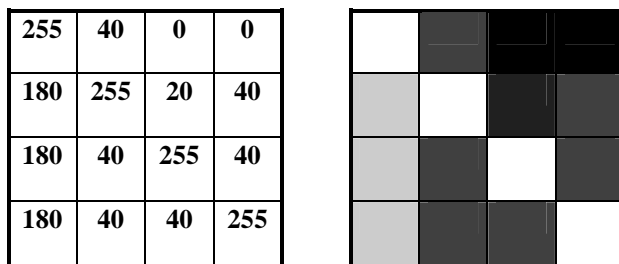
3.3.1 Vznik digitálního obrazového záznamu

Jak bylo uvedeno výše, radiometr měří z určitých elementárních ploch (rovných přibližně pixelu obrazového záznamu) kontinuálně intenzitu odraženého nebo emitovaného záření a to vždy v určitém intervalu vlnových délek. Šířka tohoto intervalu definuje tzv. spektrální rozlišovací schopnost systému (viz. dále). Princip převodu analogových dat na data digitální uvádí obr. 3.8.



Obr. 3. Chyba! Neznámý argument přepínače. Princip převodu analogových dat na data číselná (vysvětlivky viz text)

Pásma označená na obrázku čísly 1, 2 a 3 mají větší spektrální rozlišení než pásmo 4. Každý systém navíc pořizuje data v několika intervalech spektra - v tzv. multispektrálním režimu. Hodnoty, které nesou jednotlivé obrazové prvky (tzv. **DN hodnoty**), jsou tedy vždy určitou průměrnou hodnotou pro plochu reprezentovanou jedním obrazovým prvkem. Při převodu do číselné podoby jsou v závislosti na kvalitě radiometru škálovány do určitého intervalu výstupních hodnot. Jeden takto vytvořený obrazový záznam určitého území je vizualizován ve formě černobílého obrazu - každá hodnota DN je tedy převedena na stupeň šedi obvykle tak, že čím nižší hodnota DN (čím menší množství záření), tím tmavší pixel obrazu (obr. 3.9). Toto zobrazení však může být u některých obrazů i inverzní. Tak je tomu například u termálních obrazových záznamů některých meteorologických družic.

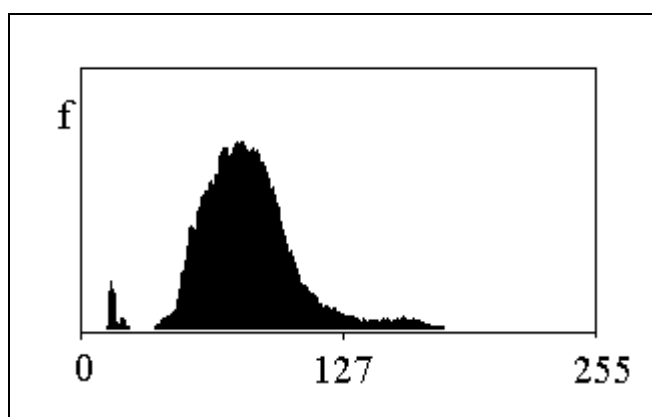


Obr. 3. Chyba! Neznámý argument přepínače. Vztah mezi stupněm šedi obrazového záznamu a hodnotami DN.

3.3.2 Histogram obrazového záznamu

Histogram snímku představuje jednak základní způsob informace o rozložení DN hodnot v obraze, jednak také základní prostředek pro úpravu kontrastu či jednoduchou klasifikaci. Je to sloupcový diagram, který udává rozložení četnosti DN hodnot v obraze. Základní charakteristiky obrazu lze vyčíst z tvaru histogramu, rozsahu zaznamenaných DN hodnot (hodnoty minima a maxima), polohy v rámci možného dynamického rozsahu zaznamenaných hodnot apod. Uvedené charakteristiky jsou často kvantifikovatelné prostřednictvím popisné statistiky.

Z histogramu uvedeného na obr. 3.10 je zřejmé, že naprostá většina DN hodnot obrazu zabírá dolní polovinu dynamického rozsahu, nezvýrazněná obrazová data budou tedy mít malý kontrast a celý snímek bude velmi tmavý. Z bimodálního tvaru histogramu je zřejmé, že v daném obraze se nacházejí dva základní druhy povrchů, které se velmi dobře odlišují. Protože uvedený histogram byl sestaven z dat LANDSAT TM-4, která zaznamenávají část blízkého infračerveného záření, ze základních poznatků o spektrálním chování povrchů je zřejmé, že první, menší vrchol bude odpovídat vodním plochám v obraze, druhý hlavní vrchol potom ostatním povrchům mimo vodní plochy. Oba druhy povrchů bude možné v obraze poměrně přesně odlišit. Velká hodnota maxima, značně se lišící od ostatních DN hodnot zastoupených v obraze, ukazuje na tzv. bitovou chybu, kterou by bylo zapotřebí během předzpracování korigovat. Z tvaru histogramu lze také určit vhodný způsob úpravy kontrastu (viz dále).



aritmetický průměr: 82,6 minimum: 6
medián: 80,0 maximum: 245
směrodatná odchylka: 26,9

Obr. 3. Chyba! Neznámý argument přepínače. Příklad histogramu obrazového záznamu a základních statistických charakteristik; f - četnost pixelů určité hodnoty

3.3.3 Souřadný systém

Vizualizovaný digitální obrazový záznam představuje matici dat o určitém rozměru. V závislosti na použitém zpracovatelském systému má souřadný systém tohoto obrazu počátek například v levém horním rohu, souřadnice obrazového prvku v počátku má koordináty 0,0. Rozměr celého obrazu je potom definován počtem sloupců a řádků. Poloha každého obrazového elementu v rámci obrazu je jednoznačně určena příslušným řádkem a sloupcem v matici dat. Neupravená originální obrazová data mají pouze tento **soubořový systém souřadnic**. Tzv. geometrickou korekcí obrazu je každému pixelu přiřazena správná poloha v určitém **systému souřadnic mapového zobrazení** - v určitém kartografickém zobrazení. Takováto data potom nazýváme **geokódovaná**.

3.3.4 Základní způsoby vizualizace digitálních obrazových dat

Naprostá většina současných systémů vytváří snímky či obrazové záznamy území v tzv. multispektrálním režimu. Tedy stejné území je zaznamenáváno v několika intervalech spektra. Každý jeden snímek či obrazový záznam pak označujeme jako **pásmo** (band, channel). Obrazová data mohou být na monitoru počítače vizualizována ve třech základních formách a to jako:

- černobílý obraz
- pseudobarevný obraz
- barevná syntéza

Digitální obraz je za pomoci výpočetní techniky nejčastěji vizualizován v **barevném systému RGB** tzv. aditivním skládáním. Systém zobrazení RGB je uveden na obr. 8.17. Výsledný obraz je tvořen smícháním rozdílného množství červené, zelené a modré složky, přičemž každá složka může v závislosti na možnostech zobrazovacího adaptéru nabývat hodnot například 0 až 255. Je-li zobrazováno pouze jedno pásmo, je intenzita červené, zelené a modré složky stejná, což dává ve výsledku černobílý obraz, ve kterém je kolísání radiometrické charakteristiky vyjádřeno různými odstíny šedi (tab. 3.1).

Tab. 3.1 Vznik černobílého obrazu v systému RGB

Vstupní pásmo			Výsledná barva
R	G	B	
0	0	0	černá
...
30	30	30	tmavě šedá
...
128	128	128	šedá
...
210	210	210	světle šedá
...
255	255	255	bílá

Barevná syntéza (tab. 3.2) vznikne kombinací většinou tří různých pásem - tedy tří různých intenzit základních barev. Měří-li pásma množství elektromagnetického záření v červené, zelené a modré oblasti viditelného světla a jsou-li tyto zobrazovány v odstínech červené, zelené a modré barvy, výsledkem je potom barevný obraz v téměř přirozených barvách. Vstupuje-li do syntézy jedno nebo více pásem, která měří množství elektromagnetického záření v jiných částech spektra - např. v infračervené - vznikne obraz v barvách nepřirozených.

Tab. 3.2 Vznik barevné syntézy ze tří vstupních pásem v systému RGB

Vstupní pásma			Výsledná barva
R	G	B	
0	0	0	černá
30	30	30	tmavě šedá
...
...
0	120	0	tmavě zelená
0	255	0	zelená
...
...
255	255	0	žlutá
255	255	255	bílá

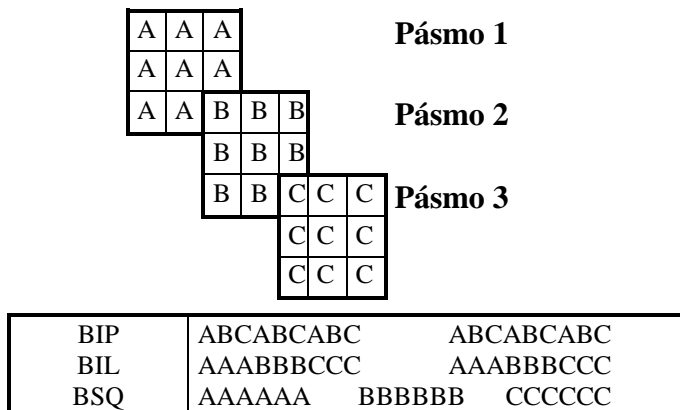
Tab. 3.3 Příklad pseudobarevné tabulky, R,G,B - intenzity základních barev - červené, zelené a modré

Vstupní pásma	R	G	B	Výsledná barva
0	255	255	255	bílá
1	175	125	0	světle hnědá
2	255	255	0	žlutá
...
...
90	25	96	0	tmavě zelená
91	0	255	0	zelená
...
...
254	0	0	180	tmavě modrá
255	0	0	255	modrá

Zvláštním druhem zobrazení je zobrazení pseudobarevné (tab. 3.3). Jde opět o zobrazení pouze jednoho pásma, kde intenzita záření není zobrazena odstínem šedi, ale určitou barvou.

3.3.5 Systém uložení digitálních obrazových dat

Vlastní obrazová data mohou být uložena na různých médiích v řadě různých formátů. Nejběžnější formáty a systém uložení dat z jednotlivých pásem je dostatečně zřejmý z obr. 3.11.



Obr. 3. Chyba! Neznámý argument přepínače. Základní způsoby uložení multispektrálních obrazových dat (podle Using PCI Software 1997)

Označení uvedených vychází z anglických názvů:

- BSQ (band sequential)
- BIL (band interleaving by line)
- BIP (band interleaving by pixel)

Kromě těchto obecných formátů řada zpracovatelských systémů uchovává jednotlivá pásma multispektrálního obrazu také v jednotlivých souborech.

Jednou z nevýhod digitálních obrazových dat jsou jejich značné nároky na kapacitu vnějších paměťových médií (srov. tab. 3.4). Proto je k jejich ukládání a archivování využíváno řady tzv. **kompresních algoritmů**.

Tab. 3.4 Paměťové nároky (v MB) na uložení jedné scény běžných družicových dat

Družice a typ dat	Rozměr scény [km]	Počet pásem	Rozměr pixelu [m]	Paměťové nároky [MB]
LANDSAT MSS	185 x 185	4	80	30
LANDSAT TM	185 x 185	7	30 (120)	300
SPOT XS	60 x 60	3	20	27
SPOT PAN	60 x 60	1	10	36

Komprese obrazové informace je založena na faktu, že DN hodnoty jednotlivých pixelů se v obraze velmi často opakují. Komprese potom řeší způsob, jak optimalizovat uložení obrazové informace s možností restaurování původního obrazu bez podstatné ztráty informace. Cílem je vždy zmenšit paměťové nároky na uložení souboru. Každý kompresní algoritmus je charakterizován tzv. kompresním poměrem, který udává, kolikrát je komprimovaný soubor menší, než soubor původní. Kompresní poměr 2:1 například znamená, že po kompresi bude soubor dvakrát menší. Obecně lze kompresní formáty rozdělit na **ztrátové** a **bezztrátové**. Neztrátové algoritmy umožňují restaurovat původní snímek v původním rozlišení, rozměru a kvalitě a jejich možností lze využívat například i pro kompresi snímků zpracovávaných např. postupy digitální fotogrammetrie, vyžadujících značné rozlišení a majících tudíž značné paměťové nároky. Použitím tzv. ztrátových algoritmů nelze obnovit obraz v původní kvalitě, jeho vizualizovaná forma je však většinou od původního obrazu nerozpoznatelná. Obrazová data zakódovaná ztrátovými algoritmy však nemají plné rozlišení dat původních a nelze jich použít k automatickému zpracování, pouze k vizualizaci. Jak uvádí CAMPBELL (1996), bezztrátová komprese družicových obrazových záznamů může dosáhnout kompresního poměru pouze od 1,04 do 1,9 : 1, v případě skenovaných tematických map lze dosáhnout dobrého výsledku ještě při ztrátové kompresi o poměru 24 : 1. Řada systémů pracuje s kompresními algoritmy v reálném čase - vyžaduje tedy co nejrychlejší proces komprese a dekomprese. Kompresní algoritmy jsou děleny také na algoritmy **symetrické** a **asymetrické**. U symetrických algoritmů je doba komprese a dekomprese stejná.

Příkladem často užívaných kompresních algoritmů je postup označovaný jako **RLE** (Run Length Encoding). Tento jednoduchý algoritmus uchovává v obraz komprimovaném tvaru jako dvojice čísel, z nichž první znamená danou DN hodnotu a druhé potom souvislý počet pixelů s touto hodnotou. Je-li tedy řádek původního obrazu tvořen následujícími pixely:

3	3	3	3	1	1	1	1	1	5	5	5	4	4	4	4
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

podle RLE algoritmu bude kódován následovně:

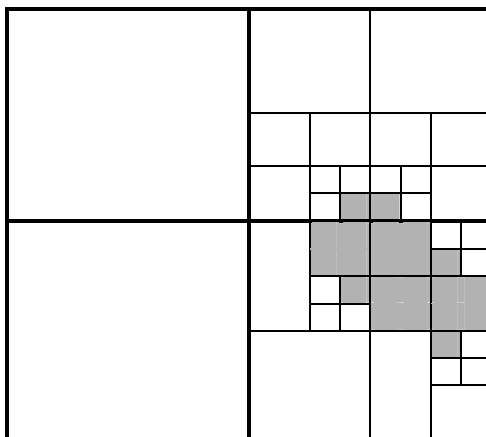
3 4 1 5 5 3 4 4

Z velké řady používaných kompresních algoritmů lze zmínit například formát JPEG. Jde o ztrátový algoritmus, u něhož však lze kompresní poměr, a tedy stupeň ztrátovosti nastavit předem. Celý obraz je rozdělen na jednotlivé bloky (podmnožiny) a každý pixel v každém bloku je transformován do frekvenčního oboru konečným počtem cosinových funkcí.

Se stále se zlepšující prostorovou rozlišovací schopností digitálních obrazových záznamů a tedy neustále rostoucími paměťovými nároky na uložení obrazových dat v současné době, souvisí také intenzivní vývoj v oblasti obrazové komprese. Patří sem například tzv. wavelet (vlnkové) algoritmy či algoritmy využívající fraktální geometrie. Případné zájemce o podrobné informace lze odkázat na práci KAYE a LEVINA (1992) nebo ŠILHANA (1997).

K často používaným formátům obrazových dat DPZ patří GeoTIFF, ECW, MrSID

Jiným způsobem je uložení obrazové informace ve tvaru tzv. optimalizovaného rastru, představovaného např. tzv. quad-tree strukturou. Quad-Tree formát je vlastně rastr s proměnlivou velikostí pixelu, kdy každý z těchto různě velkých obrazových prvků představuje homogenní část obrazu. Celý obraz je postupně dělen na čtvrtiny (quads) do té doby, dokud není každý obrazový prvek homogenní (obr. 3.12). Uvedená struktura je uložena ve formě stromu (tree). Na stejném principu funguje i struktura hex-tree (dělení na osminy) apod. Quad-tree struktury využívá pro uchování prostorové databáze například systém SPANS.



Obr. 3. Chyba! Neznámý argument přepínače. Příklad tzv. Quad-tree struktury

Kromě výše zmíněných kompresních algoritmů je různý stupeň komprese používán i v konkrétních formátech souborů, nesoucích obrazovou informaci. K těmto běžně využívaným souborovým formátům patří například TIFF, CITT; řada zpracovatelských systémů pracuje i s vlastními souborovými formáty (např. PCIDSK).

Většina systémů používá ke zpracování obrazu vedle vlastních obrazových dat i velké množství tzv. **podpůrných (pomocných) dat**. Pomocná data (grafika vektory, text apod.) mohou být uložena separátně od dat rastrových nebo s nimi tvořit jeden celek. Pomocná data mohou být následujících druhů:

- **bitové mapy**, každý pixel má "hloubku" 1 bitu - tedy nabývá pouze dvou hodnot (např. 0,1)

- **vektory** - vektorová prezentace liniových prvků či homogenních polygonů
- **spektrální příznaky** - statistická data popisující spektrální chování určitého objektu, třídy
- **textové informace** - atributy objektů
- **georeferenční data** - matematické transformace, převádějící polohu všech pixelů do určité souřadné soustavy
- **zobrazovací tabulky** - tabulky transformující podle určité funkce hrubá data na data podle této funkce zvýrazněná
- **pseudobarevné tabulky** - barevné kódování přiřazující každé hodnotě pixelu určitou barvu
- **georeferenční body** - dvojice vlíčovacích bodů zaznamenávající polohu na snímku a ve zvoleném zobrazení (systému souřadnic)
- **parametry dráhy nosiče** atd.

3.3.6 Rozlišovací schopnost digitálních obrazových záznamů

Rozlišovací schopnost je jednou ze základních charakteristik každého snímacího zařízení a obecně je mírou schopnosti rozlišit mezi signály, které jsou radiometricky, prostorově, spektrálně nebo časově podobné. V souvislosti s pořizováním obrazových dat za pomoci družicových systémů lze tedy definovat 4 základní typy rozlišovací schopnosti: radiometrickou, spektrální, prostorovou, a časovou.

3.3.6.1 Radiometrická rozlišovací schopnost

Je určena sensitivitou detektoru na sílu signálu, který je zaznamenáván. Definuje počet rozlišitelných úrovní signálu. Může být významná pro identifikaci objektu. Udává se v mocninách dvou - tedy počet rozlišitelných úrovní může být např. 64, 128, 256 (8-bitová data) nebo 1024 (10-bitová data).

3.3.6.2 Spektrální rozlišovací schopnost

Udává šířku intervalu vlnových délek elektromagnetického spektra, ve kterém senzor zaznamenává elektromagnetické záření. Šířka intervalu (pásma, kanálu) může být velká, jako je tomu v případě pásma panchromatického, zaznamenávajícího celé viditelné spektrum. Pásmo může být naopak velmi úzké, jako je tomu v případě třetího pásma LANDSAT TM, zaznamenávajícího energii ve vlnových délkách 0,63 až 0,69 mikrometrů.

Určité části spektra představují optimum pro měření řady např. biofyzikálních parametrů. Pásma jsou volena tak, aby kontrast mezi objektem zájmu a jeho okolím byl co největší. Vhodný výběr spektrálních pásem zvyšuje pravděpodobnost, že objekt bude správně identifikován a že budou také určeny také některé jeho biofyzikální parametry jako vodní obsah, množství zelené hmoty, obsah sedimentů ve vodě atd.

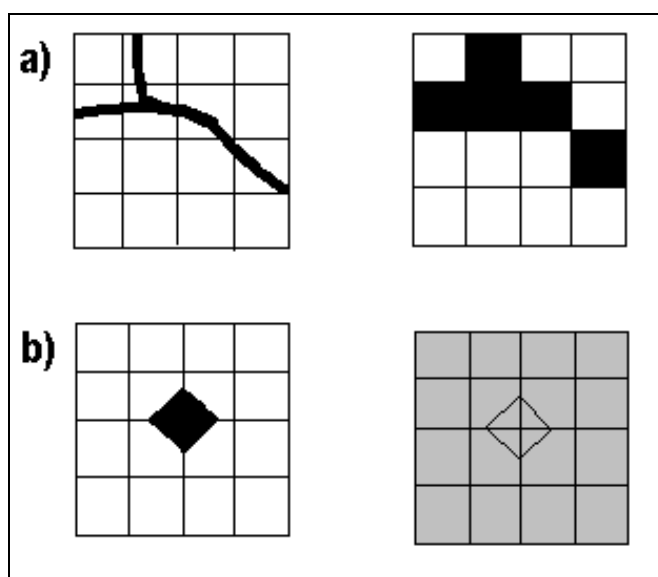
Spektrální rozlišovací schopnost je také definována jako počet pásem, ve kterých je obrazový záznam vytvářen. V tomto smyslu jsou záznamy z LANDSAT TM charakterizovány lepším spektrálním rozlišením (7 pásem), než záznamy z družice SPOT (3 pásma).

3.3.6.3 Prostorová rozlišovací schopnost

Udává nejmenší objekt, který může být na snímku ještě rozpoznán. U letecké fotografie se udává počtem čar rozlišitelných na jeden milimetr šířky - viz. např. LILLESAND a KIEFER (1994) a nebo CAMPBELL (1996). Řečeno zjednodušeně prostorové rozlišení digitálního záznamu je dáno velikostí obrazového prvku - pixelu. Tedy například u snímků z LANDSAT 5 TM je to 30 metrů.

Jak uvádí JENSEN (1986), ke zjištění objektu musí být prostorová rozlišovací schopnost senzoru menší, než polovina nejkratšího rozměru objektu. Ani tato rozlišovací schopnost však ještě nezajišťuje úspěch, zvláště když spektrální chování objektu je podobné jako chování jeho okolí (viz obr. 3.13). Na druhé straně protože DN hodnota vzniká jako průměrný příspěvek všech povrchů na ploše daného pixelu, často je možné v obraze rozlišit například liniové objekty, jejichž šířka je daleko menší, než rozměr obrazového prvku. Jak je zřejmé z obr. 3.13, prostorová rozlišovací schopnost velmi úzce souvisí se spektrálním chováním snímaných povrchů.

Z obr. 3.13 vyplývá, že v případě (a) se liniový objekt (např. vodní tok) svými odrazovými vlastnostmi výrazně liší od svého okolí a jeho průběh bude tedy v obrazovém záznamu zaznamenán, i když šířka vodního toku je daleko menší, než délka strany obrazového prvku. Naopak v případě (b), kdy spektrální chování objektu je velmi podobné jeho okolí, bude problematické tento v obraze identifikovat i přesto, že jeho rozměr je větší, než rozměr obrazového prvku.



Obr. 3. Chyba! Neznámý argument přepínače. Souvislost mezi spektrálním chováním objektů a prostorovým rozlišením. Příklady objektů s výrazně odlišnými (a) a podobnými (b) spektrálními vlastnostmi ve srovnání s jejich okolím

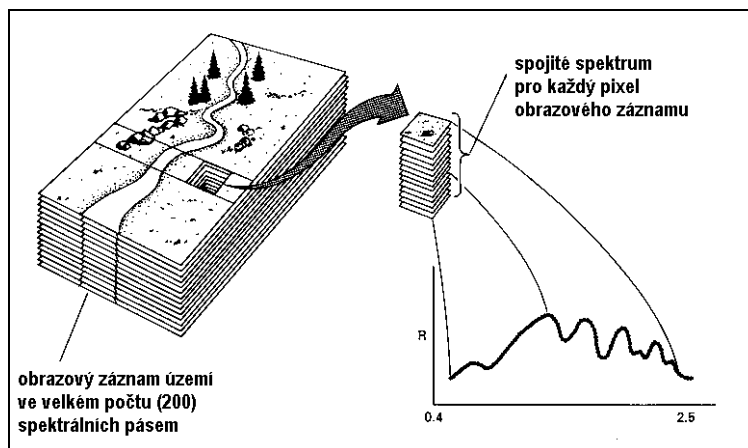
3.3.6.4 Časová rozlišovací schopnost

Udává, jak často systém poskytuje snímky daného území. Dráhy družic jsou konstruovány tak, aby se po několika obletech Země družice dostala opět na stejné místo. Nejvyšší časovou rozlišovací schopnost mají družice geostacionární, produkující snímky každých 30 minut. U družic na polárních drahách se časová rozlišovací

schopnost dá výrazně zlepšit natáčením senzorů do stran, jak je tomu v případě družice SPOT. Snímky stejného území z jiných časových období poskytují jedinečné informace při detekcích změn. Podle časové rozlišovací schopnosti to mohou být pochody s různou dynamikou - vývoj oblačných systémů, požárů, eroze nebo naopak vývoj koryt řek nebo změny v lesnatosti krajiny.

3.4 Obrazová spektrometrie

Obrazová spektrometrie je moderní metodou pořizování a zpracování obrazových dat rozšiřující tzv. multispektrální přístup na přístup hyperspektrální. Klasické družicové systémy jsou vybaveny snímacím rozkladovým zařízením (multispektrálním skenerem), které pracuje v několika málo poměrně širokých intervalech spektra (obr. 2.11). Obrazový záznam z poměrně široce vymezeného 7. pásma skeneru TM (2,08 až 2,35 μm) do značné míry „zhlazuje“ specifické rysy spektrálního chování jednotlivých minerálů. Možnosti automatické interpretace založené na teorii spektrálního chování jsou potom do značné míry omezené. Právě toto omezení se snaží překonat tzv. obrazová spektrometrie, jejíž koncept je znázorněn na obr. 3.14.



Obr. 3. Chyba! Neznámý argument přepínače. Princip obrazové spektrometrie a hyperspektrálního skenování (upraveno podle LILLESANDA a KIEFERA 1994)

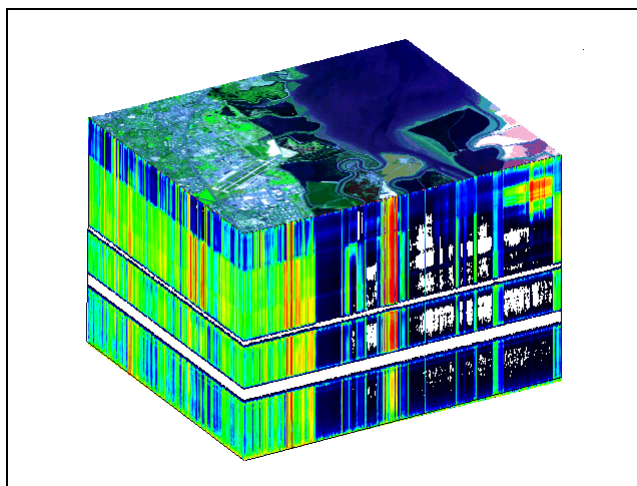
Obrazová spektrometrie využívá tzv. **hyperspektrálního skeneru**, jehož princip je stejný jako u klasických snímacích rozkladových zařízení, ovšem toto zařízení pořizuje velké množství (několik stovek) obrazových záznamů daného území ve velmi úzkých na sebe navazujících intervalech spektra v oblasti viditelného, blízkého a středního infračerveného elektromagnetického záření. Jak je zřejmé z obr. 3.14, takovýto způsob umožňuje získat kontinuální záznam zářivých i odrazových vlastností (spektrálního chování) ve výše uvedeném rozsahu spektra. Zatímco tedy například v případě sedmého pásma skeneru LANDSAT TM získáme pouze jednu charakteristiku o spektrálním chování objektů pro interval spektra o šířce 0,27 μm , v případě hyperspektrálního skeneru získáme jeden obraz území pro interval o šířce 0,01 μm . To nám tedy umožní studovat v rámci spektrálního chování objektů daleko větší detaily.

V laboratorně určených spektrech některých vybraných minerálů se v závislosti na jejich chemickém složení v jejich spektrech vyskytují poměrně úzké typické absorpční pásy. Zatímco v případě LANDSAT TM-7 je informace o umístění těchto absorpčních pásů „zhlazena“ šířkou použitého pásma, v případě hyperspektrálních obrazových záznamů lze daleko přesněji určit lokalizaci absorpčních pásů, a tedy i výskyt jednotlivých minerálů. Obrazová spektrometrie se tedy vyznačuje velmi dobrou spektrální rozlišovací schopností a navíc umožňuje získat kvantifikovatelná měření odrazových vlastností.

Příkladem hyperspektrálního skeneru může být systém **AIS (Airborne Imaging Spectrometer)** poskytující 128 spektrálních pásem o šířce 9,3 nm v oblasti vlnových délek 1,2 až 2,4 μm . Při výšce letu 4200 metrů je prostorové rozlišení obrazových

záznamů asi 8 metrů. Druhým příkladem je systém **AVIRIS (Airborne Visible - Infrared Imaging Spectrometer)**. Tento systém paracuje v 224 pásmech o šířce 9,6 nm v oblasti spektra od 0,4 do 2,45 μm . Systém pracuje na letadlovém nosiči s výškou letu přibližně 20 km a pořizuje obrazová data z území o šířce 10 km s prostorovým rozlišením přibližně 20 metrů. Komerčně přístupná hyperspektrální data poskytuje systém **CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager)**. Tento systém používá podélného skenování ke sběru dat v 228 pásmech v oblasti 0,4 až 0,9 μm o šířce pásma 1,8 nm. Počet, umístění i šířka jednotlivých pásem jsou u tohoto systému programovatelnými proměnnými v závislosti na zaměření projektu. Systém je pro možnosti geokódování obrazových záznamů doplněn GPS.

Nový charakter dat poskytovaný metodami obrazové spektrometrie si vynucuje také používání nových metod k jejich zpracování. Jakákoli tři pásma z hyperspektrálního skeneru lze kombinovat v barevné syntéze v systému RGB. Protože tento tradiční systém vizualizace je omezen použitím právě pouze tří pásem, jsou v současné době hledány vhodnější možnosti vizualizace hyperspektrálních dat. Jedním z těchto způsobů je např. tzv. **spektrální kostka**. Tato má podobu krychle nebo kvádrů, jehož tři osy jsou definovány řádky obrazového záznamu, sloupci obrazového záznamu a hodnotami radiometrické charakteristiky jednotlivých pásem (obr. 3.15).



Obr. 3. Chyba! Neznámý argument přepínače. Spektrální kostka. Příklad prezentace hyperspektrálních dat ze skeneru AVIRIS převzato z <http://www.ltid.inpe.br/html/pub/docs/gallery/gallery.htm>

Takovýto obraz poskytuje jak prostorovou informaci prostřednictvím barevné syntézy tří libovolných pásem, tak spektrální informaci o studovaném území ve formě barevného kódování jedné strany kostky. Z takto sestavených hyperspektrálních dat lze poměrně jednoduše zjistit intervaly spektra, ve kterých se daný povrch spektrálně odlišuje od svého okolí. Identifikace jednotlivých povrchů, ale také například jednotlivých minerálů či hornin a nebo druhů zemědělských plodin může být při využití hyperspektrálních dat do značné míry zautomatizována. Detailní spektrum zjištěné z hyperspektrálního záznamu je porovnáváno s laboratorně zjištěnými „průměrnými“ spektry z pozemních radiometrických měření uložených v databázi (knihovně) spekter a na základě např. korelační analýzy lze identifikovat zkoumaný povrch či minerál (UHLIR 1995).

S použitím hyperspektrálních dat lze velmi přesně lokalizovat například vodní absorpční pásy zjišťovat rozdíly ve spektrech jednotlivých druhů rostlin i zemědělských plodin,

způsobené rozdílnou aktivitou chlorofylu. To umožňuje jejich přesnější identifikaci či odhalení procesů spojených například s vodním nebo teplotním stresem rostlin. Hyperspektrálních dat je v oblasti vegetačních studií využíváno také například k přesné lokalizaci a tvaru tzv. „**red edge**“, tedy vlnových délek v intervalu přibližně 0,68-0,76 μm ve kterých je zaznamenán výrazný nárůst odrazivosti vegetace (CURRAN a KUPIEC 1995). Jeho přesná lokace či posun od oblasti kratších či delších vlnových délek může být indikátorem řady procesů probíhajících v rostlinách (CURRAN 1994). Tímto postupem lze například zjistit také zvýšenou koncentraci těžkých kovů v půdě, která se projeví v odumírání dřevin. Použití dat z AVIRIS pro studium rostlin a stanovení vybraných parametrů půdního substrátu uvádí ROBERTS et al. (1993). Další možnou aplikací je lokalizace ropných skvrn či jiných druhů znečištění (PARSONS 1994) apod. Množství informací o systému AVIRIS i o obrazové spektrometrii obecně lze nalézt na adrese:

<http://www.ltid.inpe.br/html/pub/docs/gallery/gallery.htm>

Nové možnosti, které nabízejí data získaná hyperspektrálním skenerem však úzce souvisejí také s možnostmi tato data interpretovat - tedy s vývojem vhodných algoritmů digitálního zpracování obrazu pro obrazovou spektrometrii. Základní přístupy ke zpracování hyperspektrálních dat jsou naznačeny v kapitole 10.3.

4. Dálkový průzkum Země v tepelné části spektra

Část spektra elektromagnetického záření navazující na záření infračervené ve vlnových délkách přibližně od 3 mikrometrů je označována jako tepelná (termální). Ve srovnání s kratšími vlnovými délkami (optická část spektra) se termální záření liší svými vlastnostmi, do jisté míry také způsobem snímání a vytvářením obrazového záznamu a především také aplikacemi a způsobem využití těchto dat. V těchto delších vlnových délkách již převažuje vlastní vyzařování objektů nad odraženým slunečním zářením a umožňuje získat především informace o tzv. **radiální teplotě objektů**. Tepelné vlastnosti objektů odvozené z jejich vlastního vyzařování lze zaznamenat do jisté míry i na infračervené fotografii, ovšem jak plyne ze základních zákonů záření, pouze pro horké objekty jako požáry, vulkány a podobně, jejichž teplota značně převyšuje průměrnou teplotu běžných povrchů (tedy asi 300 K).

Termální skener pracuje na stejném principu jako mechanooptický skener (viz obr. 3.2). V důsledku vlivů atmosféry je možné získávat informace především ve dvou intervalech vlnových délek: 3-5 mikrometrů a 8-14 mikrometrů. Měřícími prvky termálního skeneru jsou fotonové detektory. Pro maximální sensitivitu jsou tyto detektory ochlazovány na teplotu kolem -200 stupňů Celsia tekutým dusíkem nebo héliem (LILLESAND a KIEFER 1994). Snímaná termální energie je buďto převáděna do číslicové podoby a registrována na záznamové médium (např. magnetickou pásku) a nebo je vytvářen analogový snímek fotografováním z obrazovky. Zároveň může být každý snímaný řádek zobrazován na osciloskopu. Současné systémy umožňují v závislosti na konfiguraci systému a termálních vlastnostech zkoumaného povrchu měřit radiální teplotu s přesností 0,1 °C.

Celý systém pracuje podle následujícího schématu: Záření ze zemského povrchu dopadá na rotující zrcadlo, další části optického systému směřují dopadající energii na detektor, který je uzavřený v ochlazujícím boxu naplněném tekutým dusíkem. Detektor konvertuje dopadající signál na signál elektrický, který je zaznamenáván elektronikou na záznamové médium. Zesílený signál může být směřován také na stínítko katodové trubice. Odtud je zobrazený signál snímán a po jednotlivých řádcích je vytvářen analogový obrazový záznam např. na citlivé vrstvě filmu. Na takto vytvořeném analogovém záznamu mají obvykle povrchy s vysokou teplotou na negativu vysokou hustotu filmu. Na pozitivech se tyto teplé oblasti potom zobrazí světlými tóny.

4.1 Princip tepelného záření

Běžným způsobem je teplota objektů měřena tak, že je na ně (případně do nich) položeno čidlo měřícího zařízení - např. teploměr. Tímto způsobem je měřena tzv. **kinetická teplota** (v meteorologii, v případě teploty vzduchu také tzv. termodynamická teplota). Kinetická teplota je interním projevem energie molekul tvořících těleso. Vedle tohoto interního projevu také objekty vyzařují energii jako funkci své teploty. Toto vyzařování je vnějším projevem energie tělesa. Právě tento vnější projev energie tělesa je předmětem zájmu termálního snímání metodami dálkového průzkumu Země. Vyzářená energie potom vyjadřuje tzv. **radiální (jasovou) teplotu** tělesa.

Ve 2. kapitole byl popsán fyzikální princip elektromagnetického záření pomocí tzv. **absolutně černého tělesa**. Každé těleso, které má teplotu vyšší než absolutní nula (minus 273,15 °C) emituje záření, jehož intenzita a spektrální složení jsou funkcí typů materiálu a jeho teploty. Obr. 2.3 znázorňuje spektrální rozdělení energie vyzařované z

povrchu těles s různou teplotou. Všechny křivky mají podobný průběh a jejich vrchol se posunuje ke kratším vlnovým délkám s růstem teploty tělesa. Tento vztah je vyjádřen **Wienovým zákonem posuvu**. Celková intenzita vyzařování určitého tělesa je dána plochou pod danou křivkou pro danou teplotu. Matematicky je tento vztah pak popsán **Stefan Boltzmannovým zákonem**. Z něho plyne, že celková radiace z povrchu absolutně černého tělesa je přímo úměrná čtvrté mocnině jeho teploty (podrobněji viz kapitola 2.) Z uvedeného tedy vyplývá, že vyzařování z povrchu tělesa lze využít k určení jeho teploty.

4.1.1 Radiace z reálných materiálů

Reálná tělesa se nechovají jak o absolutně černé těleso. Každé reálné těleso emituje pouze část záření, které by emitovalo absolutně černé těleso o stejné teplotě. Tato míra vyzařovací schopnosti každého reálného tělesa se nazývá koeficient vyzařování - **emisivita (ϵ)**. Je to faktor, který popisuje, jak efektivně reálná tělesa vyzařují záření ve srovnání s černým tělesem:

$$\epsilon = \frac{M_R(T)}{M_A(T)},$$

kde

$M_R(T)$ - intenzita vyzařování reálného objektu o teplotě T

$M_A(T)$ - intenzita vyzařování absolutně černého tělesa o teplotě T

Emisivita nabývá hodnot 0 až 1 a mění se s vlnovou délkou. Tzv. **šedé těleso** je těleso, jehož emisivita je menší jak 1, ale je konstantní ve všech vlnových délkách. Na každé vlnové délce je radiace z šedého tělesa částí radiace černého tělesa. Jestliže emisivita kolísá s vlnovou délkou, objekt se nazývá **selektivní zářič**. Jako selektivní zářič se chová většina reálných povrchů. Jejich emisivita závisí podle LILLESANDA a KIEFERA (1994) na teplotě, vlnové délce a v případě distančního měření také na úhlu, pod jakým je měřena. Některé povrchy vyzařují jako černé těleso v určitých vlnových délkách - např. voda ve vlnových délkách 6 až 14 mikrometrů. Hodnoty emisivity vybraných povrchů shrnuje tabulka 4.1.

Tab. 4.1 Hodnoty emisivity vybraných materiálů. Podle HUDSONA (1969) in CAMPBELL (1996).

Druh povrchu	teplota [$^{\circ}$ C]	emisivita
sníh	-10	0,85
písek	20	0,90
les	20	0,90
beton	20	0,92
suchá půda	20	0,92
vlhká půda	20	0,95
destilovaná voda	20	0,96
led	-10	0,96

Oblast elektromagnetického spektra v intervalu 8 až 14 mikrometrů je důležitá nejenom proto, že obsahuje významné atmosférické okno, ale také proto, že obsahuje vlnovou délku, na které většina materiálů na zemském povrchu vyzařuje maximálně. Protože objekty na zemském povrchu mají teplotu kolem 300 K, podle Wienova zákona posuvu je vlnová délka odpovídající maximálnímu vyzařování při této teplotě rovna 9,7 mikrometrů.

4.1.2 Atmosférické efekty

Stejně jako v případě jiných pasivních systémů má atmosféra významný vliv na intenzitu a spektrální složení energie zaznamenávané termálním systémem. Atmosférická okna určují interval vlnových délek, ve kterém je možné tepelné záření objektů snímat nejlépe. I uvnitř těchto oken atmosféra může významně zvyšovat nebo naopak snižovat hodnotu měřené radiace a to procesy pohlcování, rozptylu a vyzařování. Výsledkem těchto atmosférických vlivů je, že se objekty na zemském povrchu mohou jevit jako chladnější nebo naopak teplejší než jsou ve skutečnosti a to řádově o několik stupňů (CAMPBELL 1996). Silný vliv na množství měřené tepelné energie mají také meteorologické podmínky, které kolísají s polohou, nadmořskou výškou a časem. Pro přesné měření radiální teploty těles tedy musí být provedeny **atmosférické korekce** získaných obrazových záznamů.

4.1.3 Interakce tepelného záření s objekty na zemském povrchu.

Pro zjišťování teplotních charakteristik povrchů distančními metodami je nutné měřit pouze energii vyzařovanou povrchem. Množství vyzařené energie závisí na tom, kolik jí na těleso dopadá. Energie dopadající na povrch tělesa podléhá vedle odrazu také pohlcování (absorpci) a je také objektem vedena. Podle zákona zachování energie platí následující vztah:

$$M_I = M_A + M_R + M_T,$$

kde M_I - intenzita záření dopadajícího na povrch tělesa

M_A - intenzita pohlceného záření

M_R - intenzita odraženého záření

M_T - intenzita propouštěného (vedeného) záření

Dělíme-li uvedenou rovnici hodnotou M_I , můžeme definovat tři charakteristiky, které popisují schopnost povrchu absorbovat, odrážet a vést elektromagnetické záření. Tyto charakteristiky jsou:

$\alpha(\lambda)$ - pohltivost

$\rho(\lambda)$ - odrazivost

$\tau(\lambda)$ - propustnost,

a jsou definovány následovně:

$$\alpha(\lambda) = \frac{M_A}{M_I}$$

$$\rho(\lambda) = \frac{M_R}{M_I}$$

$$\tau(\lambda) = \frac{M_T}{M_I}$$

Potom tedy platí následující vztah:

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$$

Z Kirchofova zákona plyne, že emisivita objektu je rovna jeho pohltivosti na dané vlnové délce. Tedy tělesa, která elektromagnetickou energii intenzivně vyzařují, budou také intenzivně pohlcovat a naopak. Podle práce LILLESANDA a KIEFERA (1994) lze ve většině aplikací dálkového průzkumu Země považovat položku propustnosti $\tau(\lambda)$ za rovnu nule a potom tedy platí:

$$\varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) = 1$$

V oblasti tepelného záření tedy platí, že čím nižší je odrazivost tělesa, tím vyšší je jeho emisivita a naopak. Například vodní plochy neodrážejí v tepelné části spektra téměř žádnou energii a emisivita je téměř rovna jedné. Výrazně nižších hodnot emisivita nabývá u materiálů, které energii intenzivně odrážejí, jako například plechové střechy budov a podobně. Podle KOLÁŘE (1990) lze výše uvedený vztah také použít k určení emisivity z hodnot odrazivosti.

Z výše uvedeného tedy plyne, že Stefan - Boltzmannův zákon lze pomocí emisivity upravit pro reálná tělesa následujícím způsobem:

$$M = \varepsilon \sigma T^4$$

Podle LILLESANDA a KIEFERA (1994) z výše uvedeného vztahu je pro aplikace dálkového průzkumu v tepelné části spektra důležitý fakt, že v důsledku rozdílné emisivity mohou mít stejně teplé objekty rozdílné hodnoty měřeného signálu termálním senzorem. V důsledku rozdílu mezi radiační a kinetickou teplotou mohou dva povrchy, jejichž reálná (kinetická) teplota je stejná, ale jsou charakterizovány rozdílnou emisivitou, vykazovat rozdílné hodnoty radiační teploty naměřené termálním skenerem. Pro určení reálné teploty těles nebo povrchů je nutné znát vedle radiační teploty také jejich emisivitu. Reálnou (kinetickou) teplotu tělesa lze určit z následujícího vztahu:

$$T_{rad} = \varepsilon^{\frac{1}{4}} T_{kin}$$

Radiační teplota povrchů je tedy v důsledku emisivity nižší než teplota kinetická (reálná). Dalším důležitým faktem je, že tepelné senzory měří radiační teplotu z povrchu těles, podle CAMPBELLA (1996) přibližně z vrstvy o mocnosti asi 50 μm a děje probíhající v této vrstvě spojené například s procesy evapotranspirace mohou výrazně ovlivňovat měřenou radiační teplotu, která se opět může výrazně lišit od reálné teploty celého tělesa či povrchu.

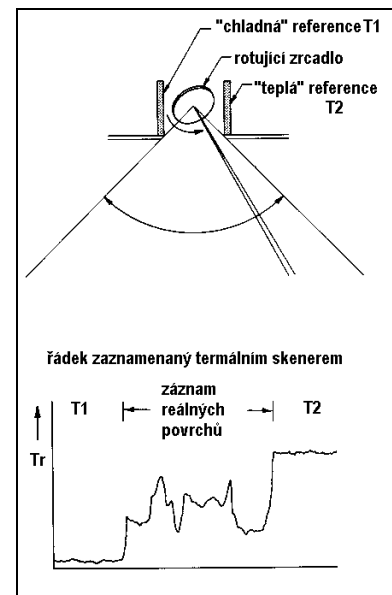
4.1.4 Kalibrace obrazových záznamů termálního skeneru

V důsledku výše zmíněných geometrických distorzí obrazových záznamů mechanooptického (příčného) skeneru je problematické použití termálních obrazových záznamů v aplikacích vyžadujících přesnou lokalizaci studovaných objektů. Termálních obrazových záznamů se často používá společně s leteckou fotografií studovaného území, to ale samozřejmě nelze v případě nočních snímků. Z termálních obrazových záznamů je tedy exploatována pouze „radiometrická“ informace, „geometrickou“ informaci lze získat z letecké fotografie. I v tomto případě musí být radiometry pracující v tepelné části spektra pro možnost kvantifikovatelných měření (např. pro výpočet radiačních teplot) velmi přesně kalibrovány. Těchto kalibračních postupů je celá řada, Jeden z nich je schematicky uveden na obr. 4.1.

Pro přesnou kalibraci termálních měření obsahuje konstrukce termálního skeneru dvě referenční plochy, jednu označovanou jako „studenou“ a jednu jako „teplou“. Teplota těchto referenčních ploch je přesně zjištěna a odpovídá přibližně teplotním extrémům skenovaného území. V průběhu skenování každé řádky obrazového záznamu skener na počátku a konci řádky snímá teplou nebo studenou referenční plochu (viz. obr. 4.1). Tímto způsobem lze tedy vztáhnout hodnoty každého obrazového prvku k absolutní teplotě. Přesnost takto kalibrovaných termálních obrazových záznamů se pohybuje od několika desetin stupně do jednotek stupňů a závisí na parametrech měřicího systému (např. výška letu), na vnějších atmosférických podmínkách (vlivy atmosféry jsou však

často zanedbány) a také na charakteru snímaného povrchu (v případě vodních ploch je měření přesnější jak v případě souše).

Vlivy atmosféry při kalibraci termálních obrazových záznamů jsou implementovány prostřednictvím atmosférických modelů, do kterých vstupuje řada parametrů jako vertikální teplotní profil atmosférou, tlak vzduchu, koncentrace CO_2 . Řada těchto kalibrací je založena na korelaci mezi měřením termálním skenerem a pozemními měřeními vybraných meteorologických prvků, která jsou prováděna přibližně v době přeletu nosiče vytvářejícího termální obrazový záznam. Z hodnot naměřených skenerem a z pozemních hodnot korigovaných parametry atmosférického modelu je sestavena kalibrační křivka umožňující poměrně přesně určit reálnou teplotu povrchů. Kalibraci termálních obrazových záznamů se zabýval např. LECKIE (1982), podle kterého je pro kvantitativní měření reálné teploty těles nejdůležitější odhad emisivity a také atmosférické korekce, ostatní chyby (chyby kalibrace čidla apod.), jsou pouze nepřesnostmi druhého řádu a lze je zanedbat.



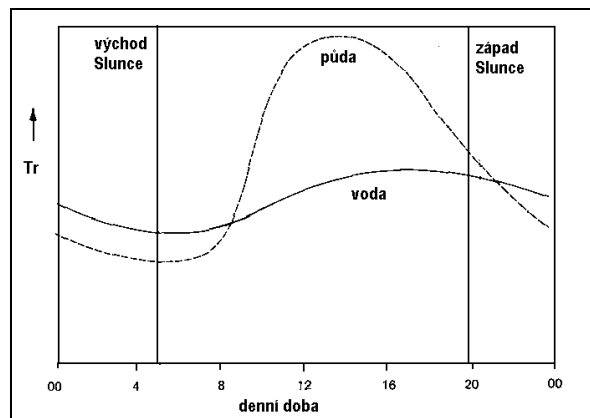
Obr. 4. Chyba! Neznámý argument přepínače. Způsob kalibrace termálních radiometrů a obrazových záznamů. T_r - radiační teplota. Podle LILLESANDA a KIEFERA (1994)

4.2 Interpretace obrazových záznamů termálního skeneru

Velká většina obrazových záznamů z termálního skeneru je pořizována z družicových systémů (např. data z LANDSAT TM-6 nebo z třetího až pátého pásma NOAA AVHRR), v řadě aplikací však bylo využito i termálních obrazových záznamů pořízených z letadla - například termovizní snímání části území Prahy (KRTKOVÁ 1990). Tepelných snímků je využíváno například k určování druhů hornin, lokalizaci geologických zlomů, mapování půdních druhů a vodního obsahu půd, lokalizaci netěsností zavlažovacích kanálů, zjišťování teplotních charakteristik vulkánů, studiu evapotranspirace, lokalizaci teplých a studených pramenů a gejzírů, studiu teplotního znečištění, studium cirkulace v nádržích, jezerech i mořích, lokalizaci lesních požárů a požárů uhelných slojí. Obecně tedy tyto obrazové záznamy registrují dva druhy teplotních charakteristik povrchů. Prvním druhem zjišťovaných jevů jsou jevy či procesy **bodové**, charakterizované výrazně odlišnou teplotou od okolních povrchů (např.

lokalizace termálních pramenů), druhým typem informací jsou jevy **plošné**, charakterizují změny teplotních poměrů v ploše (například lesní požáry).

Mnoho aplikací má pouze kvalitativní povahu (geologie, pedologie), tedy není nutné znát absolutní hodnoty měřené radiace, předmětem studia jsou spíše relativní vztahy objektů. Některé aplikace však vyžadují přesná kvantitativní měření (například zjišťování teploty vody vypouštěné z atomové elektrárny). Při interpretaci obrazových záznamů je důležitá denní doba, kdy byly záznamy vytvořeny. Tento efekt ukazuje například obr. 4.2, který znázorňuje změny radiační teploty vody a půdy v průběhu 24 hodin. Těsně po východu a západu Slunce jsou teplotní rozdíly mezi oběma povrchy minimální, maximální jsou po poledni. Teplotní extrémy a rychlost ochlazování nebo zahřívání těles dávají významnou informaci o objektech a napomáhají jejich rozpoznání a interpretaci. Například voda je charakterizována malou amplitudou teplotních změn a maximální teploty je dosaženo později ve srovnání s půdou. Teplota vody je nižší než teplota půdy během dne a vyšší naopak v noci.



Obr. 4. Chyba! Neznámý argument přepínače. Porovnání schematizovaného denního chodu radiační teploty (Tr) vodních ploch a půdy (podle LILLESANDA a KIEFERA 1994)

Teplotní chování objektů je ovlivňováno řadou dalších vlastností. Podle SCHERERA a PARLOWA (1991) sem patří především propustnost pro záření - tedy **schopnost vést teplo - vodivost**. Například horniny vedou teplo pomalu, kovové povrchy naopak velmi rychle. Další důležitou vlastností je schopnost objektů uchovávat teplo - **tepelná kapacita**. Voda velmi dobře uchováva teplotní energii. Třetí vlastností materiálů ovlivňující jejich teplotní poměry je rychlost, s jakou tělesa mění svoji teplotu. Povrchy a materiály s vysokou **tepelná setrvačností** se vyznačují malými změnami (malou amplitudou) teploty např. v průběhu 24 hodin.

Vedle výše zmíněných teplotních vlastností povrchů je vzhled termálních obrazových záznamů ovlivňován také například topografií či orientací povrchů. Například vegetační kryt vytváří velmi komplexní povrch s množstvím ke Slunci orientovaných nebo naopak zastíněných částí. Jak již bylo naznačeno, faktorem, který výrazně mění teplotní vlastnosti povrchů, je voda. Tento fakt může znamenat na jedné straně problémy s určováním reálné teploty řady povrchů s různým vodním obsahem, na druhé straně mohou termální obrazové záznamy sloužit např. k mapování půdní vlhkosti či obsahu vody ve vegetačním krytu.

Ze základních zákonů záření vyplývá, že krátkovlnné sluneční záření bude ovlivňovat vzhled termálních snímků pouze v oblasti 3-5 μm a nebude mít vliv na delší vlnové délky (8-14 μm). Denní snímky v první uvedené části spektra (3-5 μm) budou obsahovat

tzv. **termální stíny** v částech, kam nedopadá přímé sluneční záření. Také orientace svahů bude modifikovat množství přijatého záření. Tyto efekty jsou minimalizovány na obrazových záznamech pořízených těsně před východem Slunce.

4.2.1 Vzhled termálních obrazových záznamů

Nejčastěji jsou termální obrazové záznamy vizualizovány ve stupních šedi jako černobílé snímky. Obvykle světlé tóny na snímku reprezentují teplé povrchy i když některé snímky mohou být zobrazeny inverzně. Protože obrazy zachycují dlouhovlnnou část spektra mimo viditelné vlnové délky, mají často velmi neočekávaný vzhled daný teplotními rozdíly povrchů na snímku. Termální obrazové záznamy lze vytvářet ve dne i v noci a v důsledku rozdílných teplotních vlastností povrchů mají denní a noční snímky velmi odlišný vzhled.

Na denních snímcích bývá terén světlejší než voda, voda bývá velmi tmavá. Tmavšími tóny bývá znázorněn i lesní porost. Teplotní rozdíl mezi lesem a okolní volnou krajinou může být podle ČAPKA (1988) až 5 ° C. Oblaka mají v důsledku silného odrazu záření a malého pohlcování bílou barvu.

Na nočních snímcích bývají vodní plochy naopak teplejší než terén, který na rozdíl od vody teplo poměrně rychle ztrácí. Také při teplotní inverzi, kdy se v údolích hromadí studený vzduch, bývají nižší polohy znázorněny tmavšími tóny než teplejší vyšší polohy. Protože v denních hodinách je vedle vlastního dlouhovlnného vyzařování objektů registrováno i vyzařování okolních objektů nebo zpětné záření atmosféry, bývají denní snímky charakterizovány značnou tónovou proměnlivostí. Z tohoto důvodu se také často provádí termální snímání po západu Slunce, kdy jsou ještě patrné teplotní kontrasty různých povrchů. Citlivost snímání je závislá na termálních charakteristikách povrchů a je vyšší u vodních ploch než u terénu. Radiometrické nepřesnosti jsou způsobovány vedle geometrie snímání také např. oblačností, která vytváří na termálních obrazových záznamech zmíněné termální stíny. Termální obrazové záznamy často nezobrazují ani hlavní terénní tvary, mají málo orientačních bodů, často se proto používají v kombinaci s fotografií či mapou a teplotní rozdíly jsou vyjadřovány v barevné stupnici. Mezi hlavní přednosti termálního snímání patří především možnost snímání za jakéhokoliv počasí, ve dne i v noci a dále také to, že pomocí termálních obrazových záznamů lze získat charakteristiky území, které jsou klasickými metodami zjistitelné pouze bodovým měřením.

4.2.2 Teplotní mapování

Jsou-li termální obrazové záznamy přesně kalibrovány, lze jich ve spojení s leteckou fotografií či obrazovým záznamem ve viditelné či infračervené části spektra použít k sestavování map teplotních charakteristik studovaného území. V řadě případů však termální obrazové záznamy mohou poskytovat podklady pouze pro kvalitativní porovnání teplotních charakteristik různých povrchů.

Je-li cílem sestavit mapu kvantifikující teplotní charakteristiky území je nutné v případě digitálních záznamů zjistit vztah mezi DN hodnotami skenovaného záznamu a radiační teplotou. Z výše uvedených vztahů mezi skutečnou (kinetickou) a radiační teplotou plyne, že v obecné formě může být závislost mezi DN hodnotou na termálním obrazovém záznamu a teplotou objektu následující (LILLESAND a KIEFER 1994):

$$DN = A + B \cdot \varepsilon \cdot T^4,$$

kde

DN - hodnota naměřená termálním radiometrem

A, B - kalibrační konstanty radiometru

ε - emisivita

T - kinetická teplota

Jednoduchou úpravou uvedeného vztahu lze zjistit kinetickou teplotu (T) pro každý obrazový prvek. Uvedený postup je často aplikován při využití termálních obrazových dat v meteorologii, například u družice METEOSAT pracující mimo jiné v pásmu 10,5 až 12,5 μm . Zemský povrch má v tomto intervalu z hlediska vyzařování vlastnosti téměř absolutně černého tělesa. Záření od zemského povrchu je tedy při bezoblačné atmosféře minimálně ovlivňováno a radiační teplotu lze určit z empiricky sestavených kalibračních vztahů.

V případě oblačnosti, která se chová jako tzv. „šedé“ těleso, je vztah mezi naměřenými hodnotami DN a radiační teplotou komplikován emisivitou, tlakem vzduchu, teplotou horní hranice oblačnosti a propustností oblačnosti pro záření. Uvedené vlivy jsou parametrizovány kalibračními koeficienty při prvotním předzpracování obrazu a z kanálu družice METEOSAT v termální oblasti spektra lze sestavovat například mapu teplot povrchu oceánu, mapu výšky horní hranice oblačnosti, mapu tzv. srážkového indexu umožňujícího odhad konvektivních srážek založený na korelaci s teplotou horní hranice oblačnosti apod. Kalibrací obrazových dat z METEOSATu se zabývá např. KAŇÁK (1994), problém kalibrace termálních dat z LANDSAT TM-6 diskutují např. SCHOTT a VOLCHOK (1985).

Obrazová data z tepelné oblasti spektra pro meteorologické účely poskytují vedle geostacionárních družic také družice systému NOAA, které zaznamenávají termální elektromagnetické záření v obou hlavních atmosférických oknech (3-5 μm a 8-12 μm). Z družic pro výzkum přírodních zdrojů Země poskytuje termální obrazové záznamy skener TM na družicích LANDSAT, jehož 6 pásmo měří intenzitu teplotního záření v intervalu 10,4-12,5 μm s prostorovou rozlišovací schopností 120 metrů. Vzhledem k odlišným spektrálním vlastnostem objektů v termální části spektra ve srovnání s daty pořízenými v oblasti viditelného či blízkého infračerveného záření, termální obrazové záznamy mohou významně přispívat i k úspěšnosti automatické klasifikace multispektrálních dat (PRICE 1981). Zde je však problémem rozdílná prostorová rozlišovací schopnost termálních dat a dat pořízených v oblasti viditelného a blízkého infračerveného záření.

Termálních obrazových záznamů bylo využito pro nejrůznější environmentální aplikace - například mapování povrchové teploty půdy na zemědělských plochách (HATFIELD et al. 1982), mapování půdní vlhkosti (PRATT a ELLYETT 1979), mapování teplotního znečištění zastavěných oblastí (GOWARD 1981), či odhady radiační bilance území - např. TOLL (1985), WÜTHRICH (1991), PARLOW (1990).

5. Dálkový průzkum Země v mikrovlnné části spektra

V oblasti viditelného a také blízkého či středního infračerveného záření nelze v řadě případů získat metodami distančního měření potřebnou informaci o zemském povrchu či procesech probíhajících na něm nebo dokonce pod ním. Snímání je především omezeno na denní hodiny, vyžaduje vhodné povětrnostní podmínky, zemský povrch nelze snímat přes vrstvu oblačnosti. Také v polárních oblastech s nedostatečnou intenzitou slunečního záření nelze krátkovlnného záření využít. S řadou těchto nevýhod je možno se vyrovnat snímáním v mikrovlnné části spektra. Snímání zemského povrchu a objektů na něm v mikrovlnné části spektra prodělává v poslední době bouřlivý rozvoj. Ve shodě s pracemi LILLESANDA a KIEFERA (1994) nebo CAMPBELLA (1996) budeme mikrovlnnou částí spektra rozumět interval vlnových délek od 1 mm do 1 m. Z hlediska DPZ má snímání v těchto dlouhých vlnových délkách následující charakteristické rysy:

- Mikrovlnné záření je schopné se šířit atmosférou téměř za jakýchkoliv podmínek. V závislosti na vlnové délce mikrovlny procházejí skrz zákal, sněžení, déšť, oblaka i dým. Mohou však procházet i do určité hloubky v sedimentech. Tedy podávají informaci nejen o povrchu, ale i z určité hloubky.
- Odrazové a vyzařovací schopnosti objektů na zemském povrchu jsou v oblasti mikrovln odlišné od těchto charakteristik v optické části spektra. Odrazové vlastnosti povrchů jsou formovány především drsností a vodním obsahem. Odrazové vlastnosti povrchů ovlivňují jejich dielektrické vlastnosti. Hladké povrchy ve viditelné části spektra se mohou v oblasti mikrovln jevit jako drsné a naopak.

Mikrovlnnou část spektra je možné snímat jak **aktivními metodami** za pomoci **radaru**, tak i **pasivními metodami** za pomoci tzv. **mikrovlnného radiometru**. Snímání lze provádět z letadel i družic. Jak plyne ze základních zákonů záření, intenzita mikrovlnného záření emitovaného ze zemského povrchu je velmi malá, konfigurace pasivních systémů pro snímání je v řadě jejich částí odlišná od výše popsaných způsobů snímání v krátkovlnné části spektra. Na zcela odlišném principu potom fungují tzv. aktivní systémy.

Radar je zkratkou ze slov "radio detecting and ranging", což znamená, že radar byl zkonstruován jako zařízení ke zjišťování přítomnosti objektů a jejich polohy. Systém je založen na vyslání krátkého a intenzivního mikrovlnného signálu určitým směrem a zaznamenání části signálu (tzv. echa) navráceného po jeho odrazu od předmětu. Radarové systémy mohou být umístěny na zemském povrchu, letadlech i družicích a mohou i nemusí vytvářet obrazový záznam. Potom mluvíme o radaru zobrazujícím nebo nezobrazujícím. Běžným typem nezobrazujícího radaru je tzv. **Dopplerův radar**, který se používá ke zjišťování rychlosti pohybu vozidel. Tento využívá tzv. Dopplerova efektu posunu frekvencí ve vyslaném a přijatém signálu, který je právě nositelem informace o rychlosti pohybu objektu. Jinou formou nezobrazujícího radaru je tzv. **PPI radar**. Tento typ je používán v radarové meteorologii, při řízení dopravy, pro navigační účely apod. Skládá se z kruhové obrazovky, po níž se kontinuálně otáčí úzký radarový paprsek, který zaznamenává echo z rotující antény z území o poloměru několika set kilometrů.

Jako zobrazujícího radaru se využívá dvou systémů. Jednak je to jednodušší tzv. **radar s reálnou aperturou (Real Aperture RADAR)**. Protože tohoto zařízení je možné využívat pouze na letadlových nosičích, bývá označován také zkratkou **SLAR (Side**

Looking Airborne RADAR). Druhým typem je technicky složitější zařízení označované jako **radar se syntetickou aperturou - SAR (Synthetic Aperture RADAR)**, pro který je jako nosičů využíváno především družic. Oba systémy pořizují obrazový záznam po jedné nebo obou stranách od dráhy letu nosiče - proto se označují také jako **boční radar**. Jakkoliv je princip radaru znám od počátku tohoto století (CAMPBELL 1996), z důvodů technické náročnosti ale i z důvodů vojenského utajení se jeho použití pro environmentální účely opozdilo. Používání radaru k těmto účelům je v současnosti stále častější a radarová technologie i interpretace radarových záznamů je předmětem intenzivního vývoje.

Jak uvádějí např. CAMPBELL (1996), DALLEMAND et al. (1993) nebo LILLESAND a KIEFER (1994), první velký projekt k mapování terénu s využitím bočního radaru umístěného na letadle byl komplexní výzkum provincie Darien v Panamě v roce 1967. Podobný projekt byl uskutečněn v r. 1971 ve Venezuele. V r. 1971 začal projekt RADAM (Radar for the Amazon), který do r. 1976 pokryl radarovými snímky území severovýchodní Brazílie o rozloze 8,5 mil. km². Snímků bylo použito k analýze geologických poměrů, k inventarizaci lesní dřevní hmoty, lokalizaci komunikací, vyhledávání minerálů, mapování sopečných tvarů a toků velkých řek. V dalších projektech bylo radarových snímků intenzivně využíváno i k monitorování povrchu oceánu, k zjišťování charakteristik větru, vlnění a mořského ledu. Za určitých podmínek lze pomocí radarových snímků sledovat i tvary mořského dna.

Éra družicových radarových systémů počala v roce 1978 vypuštěním družice SEASAT, pokračovala na amerických raketoplánech (SIR - Shuttle Imaging Radar) a sovětskými experimenty KOSMOS. Tyto systémy byly více méně experimentální. V roce 1991 byly na oběžnou dráhu vypuštěny tři komerční družice nesoucí radar - ruský ALMAZ-1, evropský ERS-1 a japonský JERS-1. V roce 1995 byly následovány kanadským projektem RADARSAT.

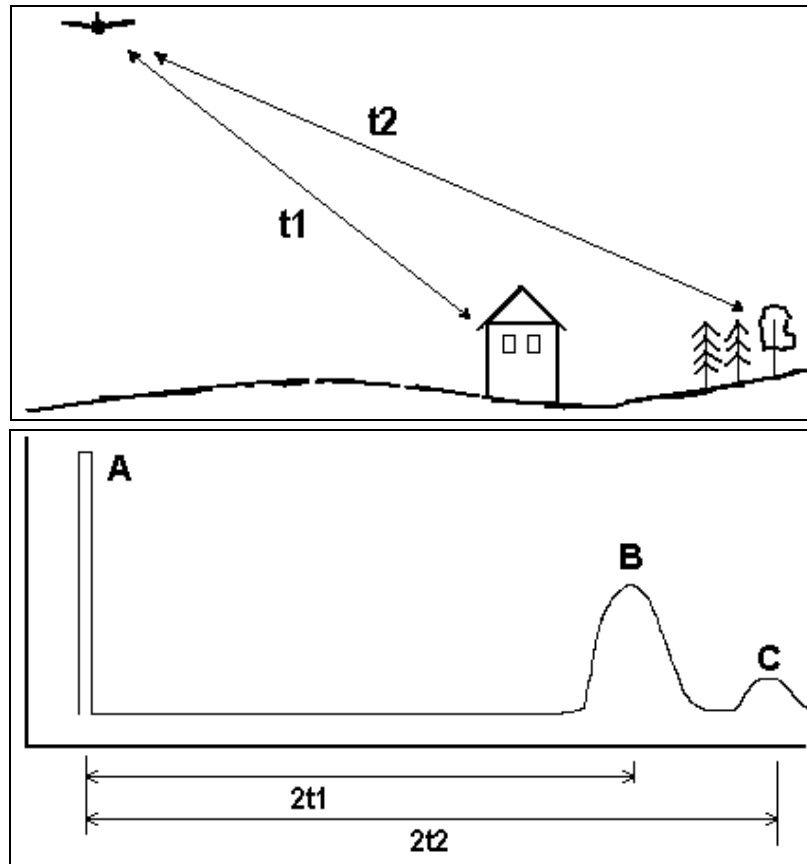
5.1 Boční radar - SLAR

Základní princip fungování bočního radaru SLAR je na obr. 5.1. Mikrovlnná energie je vyslána anténou v krátkém (10^{-6} s), intenzivním paprsku. Jakmile paprsek za časový okamžik t_1 dosáhne nějakého objektu, například budovy, je odražen a vrací se zpět k anténě, která se přepne na přijímač. Na přijímacím zařízení je přijat signál o určité intenzitě. Stejným způsobem se paprsek odráží za časový okamžik t_2 od stromů. Protože strom odráží méně mikrovlnného záření než budova, projeví se to na příjmu nižšími hodnotami echa.

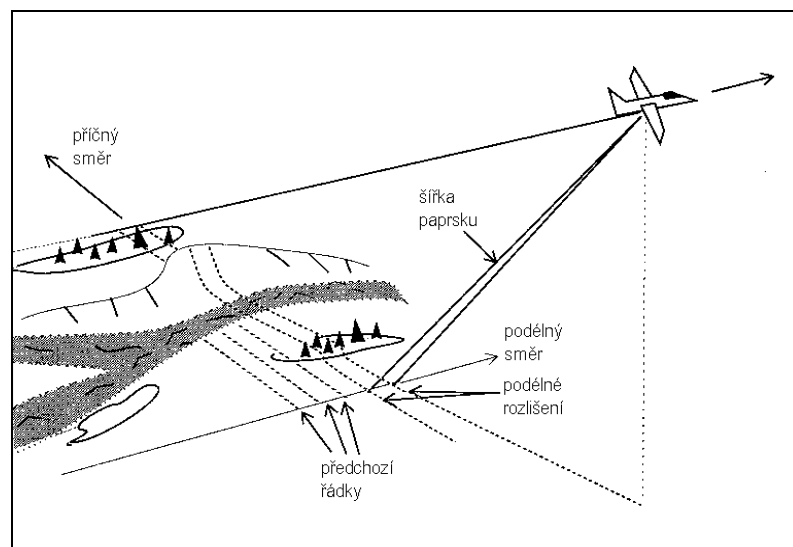
Elektronickým měřením doby mezi okamžikem vyslání signálu a přijetím echa ($2t$) může být zjištěna vzdálenost objektů. Protože se signál šíří atmosférou konstantní rychlostí světla (c), bude šikmá vzdálenost D_S mezi radarem a objektem rovna:

$$D_S = \frac{c \cdot t}{2}$$

Způsob, jakým boční radar vytváří obrazový záznam objektů na zemském povrchu, je znázorněn na obr. 5.2. Nosič se pohybuje konstantní rychlostí a zaznamenává intenzitu mikrovlnného záření odraženého od zemského povrchu z úzkého pruhu území (řádku), kolmého ke směru letu. Z jednotlivých řádků se pak skládá celý obrazový záznam. Signál může být také převáděn do číselné podoby a zaznamenán na magnetické médium.



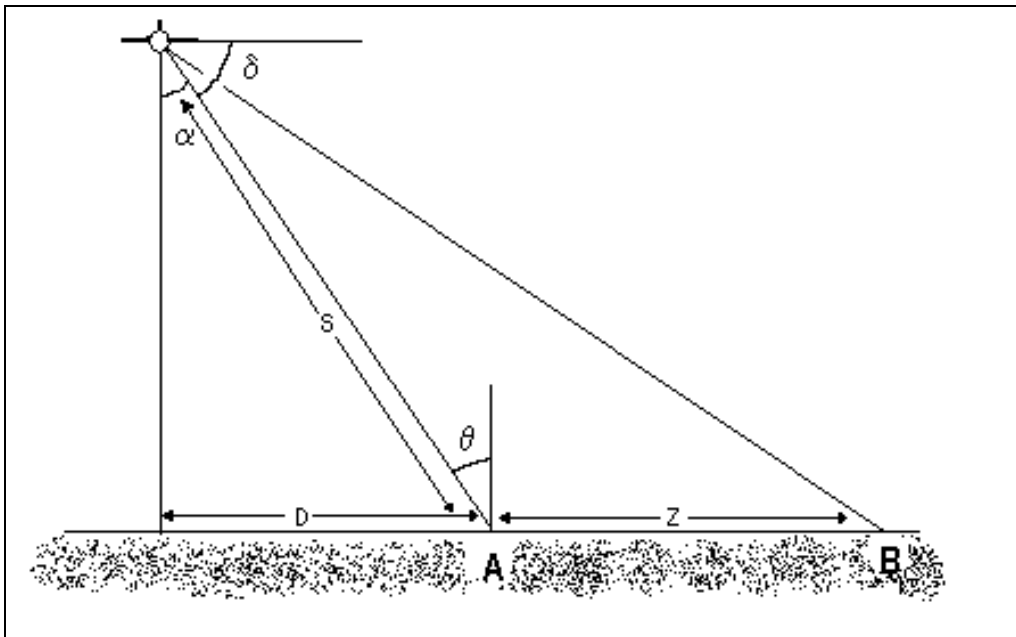
Obr. 5. Chyba! Neznámý argument přepínače. Schematické znázornění principu fungování radaru. A - počáteční impuls vyslaný anténou. B(C) radarové echo budovy (lesa) zaznamenané za časový okamžik $2t_1$ ($2t_2$)



Obr. 5. Chyba! Neznámý argument přepínače. Vytváření obrazového záznamu prostřednictvím RADARu

5.1.1 Prostorová rozlišovací schopnost bočního radaru

Oproti pasívním způsobům vytváření obrazového záznamu mají aktivní metody svoje specifika. K nim mimo jiné patří odlišný způsob určování prostorové rozlišovací schopnosti radarových obrazových záznamů. Z konstrukce bočního radaru plyne, že obrazový záznam může být definováno dvojí prostorové rozlišení (DALLEMAND et al. 1993). Jedním je **rozlišení ve směru příčném** - tedy kolmém k dráze letu nosiče, druhým je **rozlišení ve směru podélném** - tedy ve směru rovnoběžném s dráhou letu, označované také jako rozlišení ve směru azimutu. Obecně je prostorové rozlišení určováno dvěma parametry - délkou pulsu a šířkou vyslaného paprsku. Délka pulsu určuje prostorové rozlišení ve směru šíření paprsku (příčném). Šířka vyslaného paprsku určuje rozlišení ve směru podélném.



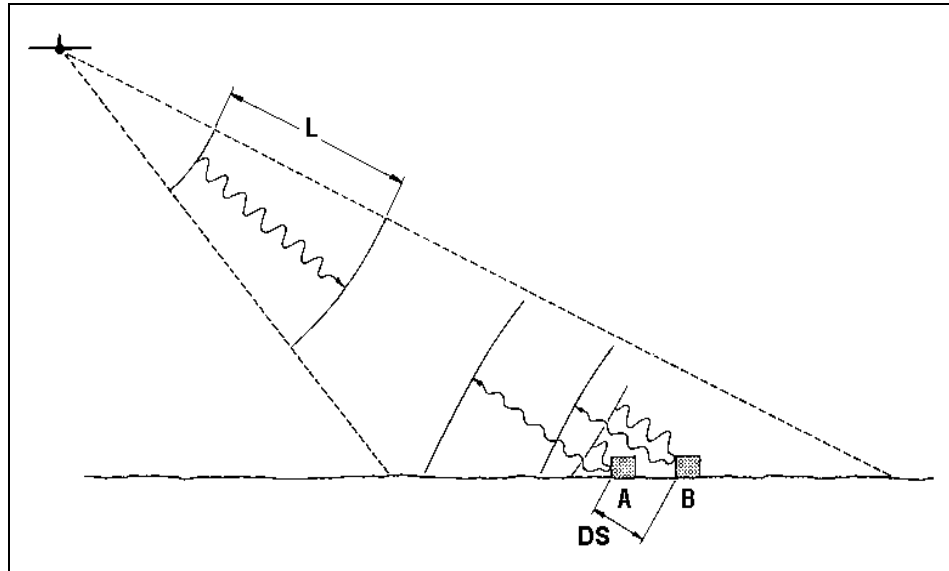
Obr. 5. Chyba! Neznámý argument přepínače. Geometrie vytváření radarového obrazového záznamu; A - oblast blízkého dosahu (near range), B - oblast vzdáleného dosahu (far range); α - úhel pohledu (look angle), δ - hloubkový úhel (depression angle), θ - úhel dopadu (incidence angle); S - šikmá vzdálenost (slant range), D - horizontální vzdálenost (ground range), Z - šířka záběru (swath)

5.1.2 Příčné prostorové rozlišení

Má-li boční radar rozlišit dva objekty, které jsou blízko sebe, je nutné, aby všechny části těchto objektů byly snímány jiným krátkým paprskem mikrovlnné energie. Jakýkoli časový překryv signálů způsobí, že na výstupu budou objekty zaznamenány jako jeden. Tento koncept je znázorněn na obr. 5.4.

Puls délky L byl vyslán směrem k objektům A, B. Bude-li šikmá vzdálenost D_s mezi budovami menší jak $L/2$, paprsek dosáhne budovy B v době, kdy se ještě stejný paprsek odráží od budovy A. V důsledku toho dojde k **překryvu** obou signálů a obě budovy budou zaznamenány jako jeden velký objekt. Bude-li šikmá vzdálenost mezi A a B větší jak $L/2$, potom obě budovy budou zaznamenány odděleně. Příčné rozlišení měřené v šikmých vzdálenostech (S) nezávisí na vzdálenosti objektu od nosiče a je rovno

polovině délky vyslaného paprsku na rozdíl od rozlišení měřeného v horizontálních vzdálenostech (D). Rozlišení v příčném směru závisí nepřímo na kosinu tzv. **hloubkového úhlu**. To je úhel sevřený horizontální rovinou a spojnicí antény a snímaného objektu. **Pohledový úhel** (look angle) - nebo také **obrazový úhel** - je potom úhel, který svírá spojnice antény a snímaného objektu s tížnicí. V případě plochého terénu je pohledový úhel roven tzv. **úhlu dopadu** (incidence angle).



Obr. 5. Chyba! Neznámý argument přepínače. Příčná prostorová rozlišovací schopnost radaru, vysvětlivky viz. text

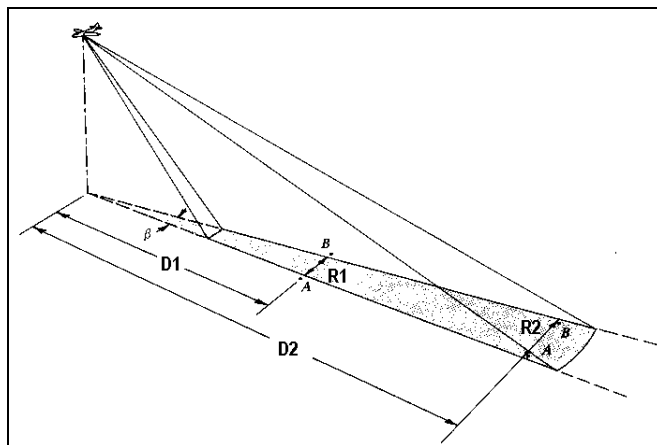
5.1.3 Podélné prostorové rozlišení

Jak je zřejmé z obr. 5.5, prostorová rozlišovací schopnost v podélném směru je závislá na šířce vyslaného paprsku (β) a na horizontální vzdálenosti D od dráhy letu. S růstem vzdálenosti od dráhy letu podélné rozlišení klesá. Na radarovém snímku bude možné objekty A a B ve vzdálenosti D_1 rozlišit, protože podélné rozlišení R_1 ve vzdálenosti D_1 od dráhy letu je větší než jejich vzdálenost. Naopak ve vzdálenosti D_2 objekty splynou do jednoho, protože šířka paprsku R_2 definující podélné rozlišení bude v této vzdálenosti větší než vzdálenost snímaných objektů.

Podélné rozlišení SLAR tedy závisí také na vzdálenosti snímaných objektů od dráhy letu nosiče a poloze v rámci snímaného pruhu území (obr. 5.3). Část obrazového záznamu snímaná blíže k nosiči s malými hodnotami úhlu dopadu se označuje jako **oblast blízkého dosahu** (near range). Naopak část obrazového záznamu snímaná dále od nosiče s velkým úhlem dopadu se označuje jako **oblast vzdáleného dosahu** (far range). Mezi šířkou paprsku (β), vlnovou délkou vyslaného signálu (λ) a délkou antény (A) platí následující vztah:

$$\beta = \frac{\lambda}{A}$$

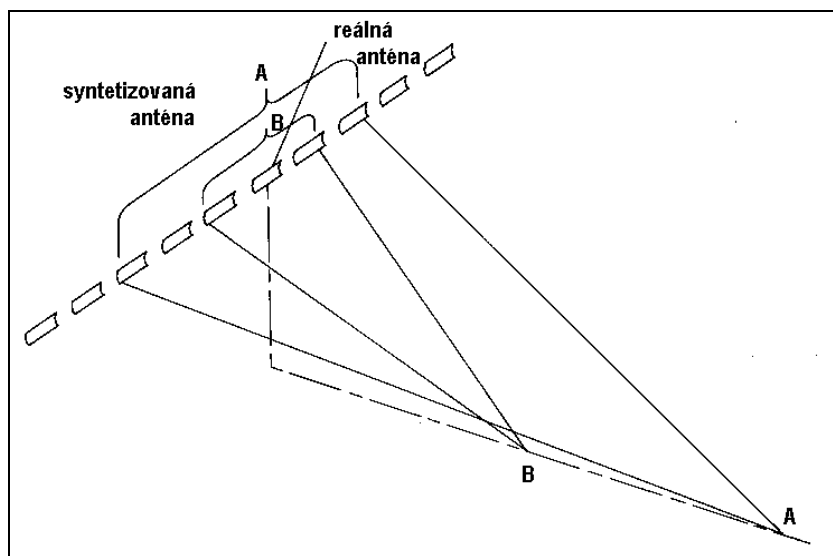
Lepšího rozlišení lze tedy dosáhnout buďto prodloužením délky antény - to sebou nese technické problémy - a nebo použitím kratších vlnových délek - ty jsou však výrazněji modifikovány atmosférou.



Obr. 5. Chyba! Neznámý argument přepínače. Podélné prostorové rozlišení SLAR, podle LILLESANDA a KIEFERA (1994); vysvětlivky viz. text

SLAR je označován také jako tzv. nekoherentní radar. Anténa u tohoto systému musí být velmi dlouhá (několik metrů), aby se docílilo dobrého prostorového rozlišení. Boční radar se vyznačuje relativní jednoduchostí, je však charakterizován malým dosahem, operuje v malých výškách a používá pouze kratších vlnových délek, které jsou více ovlivňovány v atmosféře. Tyto nevýhody překonává SAR.

5.2 Radar se syntetickou aperturou (SAR)

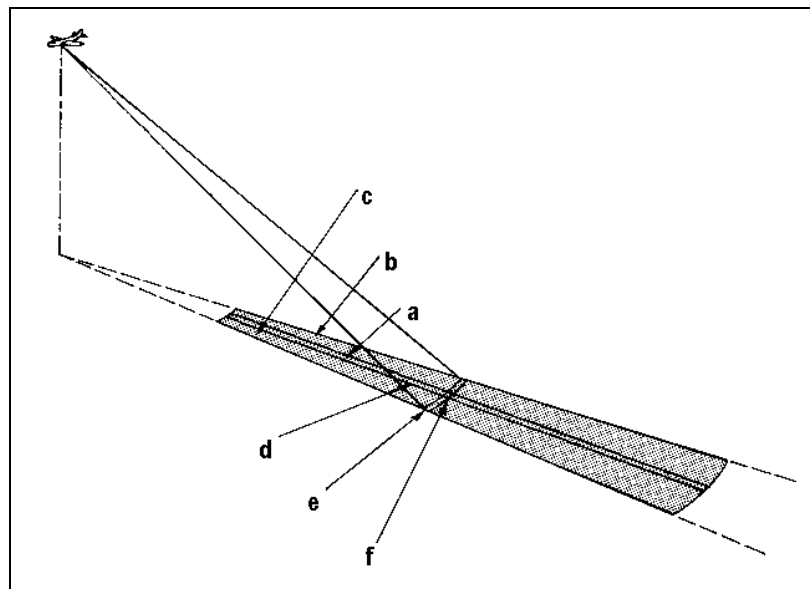


Obr. 5. Chyba! Neznámý argument přepínače. Princip SAR, podle LILLESANDA a KIEFERA (1994)

Syntetizující radar (SAR - Synthetic aperture radar) je technicky složitější zařízení, které však překonává řadu nevýhod bočního radaru a především umožňuje pořizování radarových obrazových záznamů z kosmu. SAR nese fyzicky krátkou anténu, která je však modifikováním zaznamenaného echa a následným zpracováním tzv. syntetizována. Výsledkem tohoto postupu je velmi úzký paprsek i ve velmi velkých příčných vzdálenostech od nosiče. Jak uvádí například LILLESAND a KIEFER (1994), anténa 2 metry dlouhá může být "syntetizována" až na 600 metrů. Od každého snímaného objektu se radarový signál odráží po určitý časový okamžik daný šířkou vyslaného paprsku. Za

tento časový okamžik nosič s anténou urazí určitou dráhu a postupně zaznamenává echo od objektu. Zaznamenaný signál je poté zpracován tak, jako by byl přijat anténou, jejíž délka je rovna dráze, kterou nosič urazil za dobu, po kterou byl snímáný objekt v jeho zorném poli. Zjednodušeně lze říci, že systém používá delšího úseku na své letové dráze k transformaci krátké fyzické antény na velké množství takovýchto antén. Tyto jsou matematicky transformovány do jedné velmi dlouhé antény (obr. 5.6). Objekty na zemském povrchu v malých vzdálenostech od nosiče (v oblasti blízkého dosahu) jsou zaznamenány proporcionálně menším počtem jednotlivých antén než objekty vzdálené.

Ke zlepšení podélné prostorové rozlišovací schopnosti SAR využívá i tzv. **Dopplerova posunu frekvencí**, jak je znázorněno na obr. 5.7. Signál zaznamenaný od objektu v oblasti před nosičem (c) má vyšší frekvenci, signál zaznamenaný od objektů za nosičem má frekvenci nižší (b). SAR potom zpracovává pouze střední část paprsku (a), ve které se neprojevuje Dopplerův efekt - nenastává posuv frekvencí. Tím se výrazně zlepšuje podélné prostorové rozlišení.



Obr. 5. Chyba! Neznámý argument přepínače. Princip definování podélného prostorového rozlišení SAR využívající tzv. Dopplerova posuvu frekvencí. a - oblast nulového posuvu frekvencí, b, c - oblasti s nižší (vyšší) frekvencí, d - příčné rozlišení, e - podélné rozlišení, f - výsledný obrazový prvek; podle LILLESANDA a KIEFERA (1994)

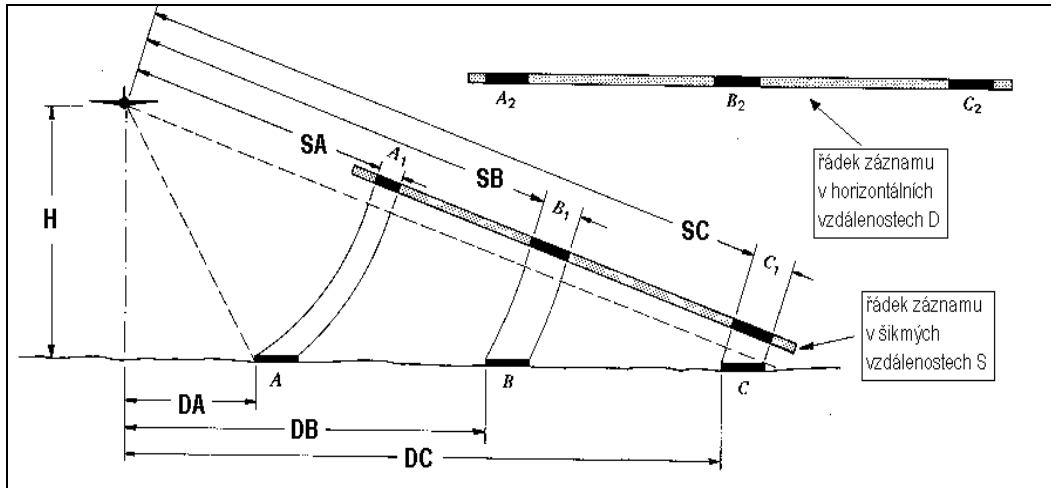
5.3 Geometrické charakteristiky radarových obrazových záznamů

V důsledku odlišného způsobu jejich pořizování je geometrie radarových obrazových záznamů pořizovaných SLAR zcela odlišná od geometrie fotografií i obrazových záznamů vzniklých pasivním snímáním. To má za následek značně odlišné vzezření radarových obrazových záznamů ve srovnání s fotografií. Geometrické charakteristiky radarových obrazových záznamů mají svá specifika především v následujících jevech:

- nejednotné měřítko
- poziční chyby v důsledku různých nadmořských výšek terénu
- efekt paralaxy

5.3.1 Změny měřítka v příčném směru

Boční radar používá dva způsoby zaznamenávání obrazové informace. Jak je zřejmé z obr 5.3, poloha objektů na snímku může být vyjádřena v **šikmých vzdálenostech** (slant range), kdy vzdálenosti mezi sousedními terénními tvary nebo objekty jsou přímo úměrné časovému intervalu mezi jednotlivými přijatými signály. V případě šikmých vzdáleností tedy dochází k relativním změnám rozměrů a deformacím měřítka radarového obrazového záznamu oproti skutečným **pozemním (horizontálním) vzdálenostem** (ground range).



Obr. 5. Chyba! Neznámý argument přepínače. Rozdíly v záznamu radarového echa v šikmých a horizontálních vzdálenostech, vysvětlivky viz. text, podle LILLESANDA a KIEFERA (1994)

Uvedenou skutečnost demonstruje obr. 5.8. Symboly A, B a C reprezentují objekty stejné velikosti nacházející se ve stejné horizontální vzdálenosti od sebe. V případě, že poloha a velikost objektů jsou prezentovány v šikmých vzdálenostech, vzájemná poloha i rozměry jednotlivých objektů A_1 , B_1 , C_1 různé. Výsledkem jsou tedy změny měřítka, které se zvětšuje s rostoucí vzdáleností od letové dráhy nosiče. Uvedené změny měřítka mohou být sice korigovány tzv. hyperbolickou korekcí (DALLEMAND et al. 1993), ztěžuje to však použití takovýchto obrazových záznamů. Pozemní (horizontální) vzdálenosti lze vypočítat ze vzdáleností šikmých při znalosti výšky letu (H) a za předpokladu plochého reliéfu pomocí Pythagorovy věty, například pro objekt A:

$$SA^2 = H^2 + DA^2$$

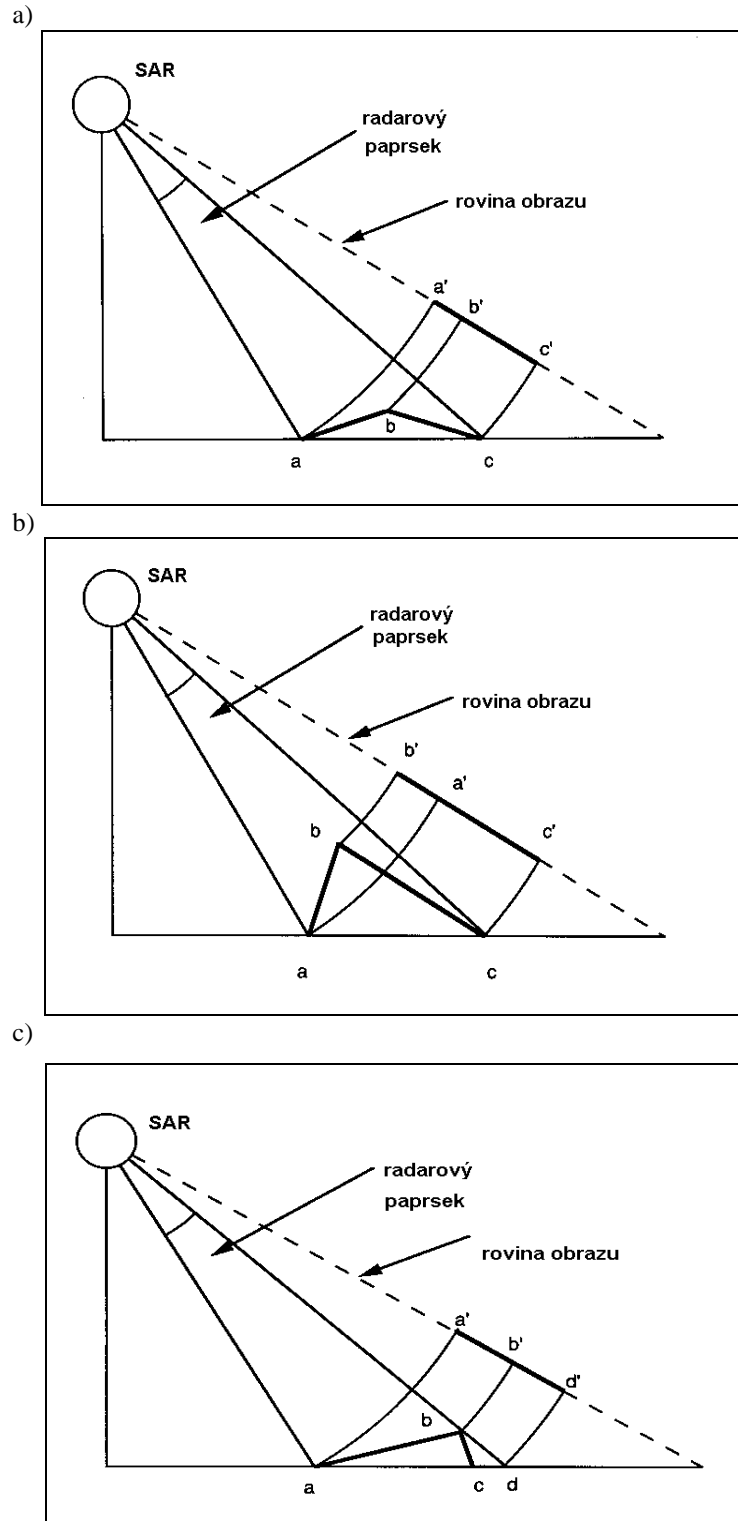
$$DA = \sqrt{SA^2 - H^2}$$

Parametry letu ovlivňují příčné i podélné měřítko. Příčné měřítko závisí na výšce letu, podélné na precizní synchronizaci rychlosti pohybu nosiče a záznamovým zařízením.

5.3.2 Poziční chyby v poloze objektů

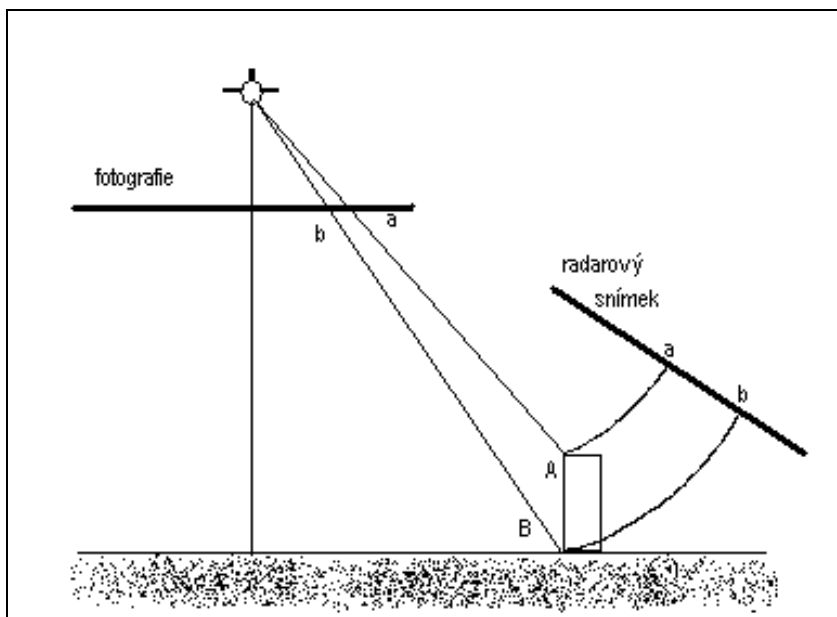
Stejně jako v případě letecké fotografie či skeneru, také u radarových obrazových záznamů dochází k relativnímu přemísťování objektů ve směru kolmém na pohyb nosiče. Avšak na rozdíl od skeneru i fotografie směr relativního přemísťování je opačný (viz obr. 5.10). Je to proto, že radar znamená vzdálenosti terénních prvků od antény. Jestliže je určitý objekt s vertikálním rozměrem snímán mikrovlnným paprskem, jeho

vrchol je dosažen paprskem dříve než jeho základna a také signál od vrcholu objektu se vrátí k anténě dříve než signál od základny. Výsledkem je, že se objekt jeví, jakoby nakloněný k linii letu. Výškově členitý terén se v závislosti na sklonu svahů a úhlu dopadu radarového signálu na radarových obrazových záznamech může zobrazovat s geometrickými distorzemi, které uvádí obr. 5.9.



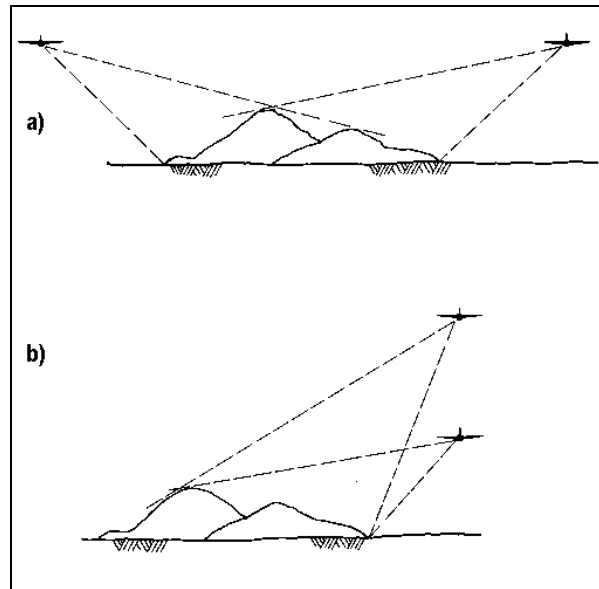
Obr. 5. Chyba! Neznámý argument přepínače. Efekty pozičních chyb v poloze objektů na radarovém obrazovém záznamu, zhuštění signálu (foreshortening) (a), zpětný překryv signálu (layover) (b), radarový stín (shadow) (c)

Jak je patrné z obr. 5.9a, svahy orientované k linii letu podléhají efektu **zhuštění signálu**, jehož důsledkem je, že délka těchto svahů na výsledném obraze výrazně zkrácena. U velmi strmých svahů může docházet k tomu, že radarový signál dosáhne vrcholu terénu dříve než paty. V tomto případě je relativní poloha vrcholu a paty na výsledném snímku převrácena. Tento efekt se označuje jako **zpětný překryv** (obr. 5.9b). V případě strmých svahů odvrácených od linie letu vzniká na radarových obrazových záznamech efekt tzv. **radarových stínů** (obr. 5.9c). Z oblasti radarového stínu nepřichází zpět k záznamovému zařízení žádný signál.



Obr. 5. Chyba! Neznámý argument přepínače. Relativní změny v poloze objektů na fotografii a radarovém snímku

5.3.3 Efekt paralaxy



Obr. 5. Chyba! Neznámý argument přepínače. Základní způsoby pořizování stereodvojic radarových obrazových záznamů. Podle LILLESANDA a KIEFERA (1994)

Je-li objekt snímán dvakrát ze dvou různých letových čar, efekt relativní změny polohy objektů v důsledku jejich různé nadmořské výšky umožňuje na obrazovém záznamu měřit efekt tzv. paralaxy. Ten je podmínkou pro vznik stereoskopického vjemu. Stereoskopickou dvojici obrazových záznamů z bočního radaru je možné získat při snímání terénu ze dvou směrů, jak je znázorněno na obr. 5.11a. Protože však v důsledku bočního snímání budou mít oba obrazové záznamy velmi odlišný vzhled (především v důsledku radarových stínů), je vytvoření stereoskopického vjemu složité. Z toho důvodu se stereoskopická dvojice radarových záznamů pořizuje ze stejné letové dráhy avšak z jiných letových hladin, jak je znázorněno na obr. 5.11b. Výsledný efekt se nazývá výšková paralaxa. V tomto případě je boční osvětlení obou snímků podobné. Třetí způsob získání stereoskopické dvojice záznamů je založen na změně hloubkového úhlu a byl použit na amerických raketoplánech (SIR-B). Vedle sestavování stereoskopických dvojic má měření snímkové paralaxy význam pro určování přibližné výšky objektů. Paralaxa je měřena z rozdílných relativních přemístění reliéfu na obou snímcích tvořících stereomodel.

5.4 Charakteristika radarového signálu

Část radarového signálu, která se po odrazu od objektů dostává zpět k anténě a po jednotlivých obrazových prvcích vytváří výsledný radarový obrazový záznam, je formována řadou parametrů. Lze je obecně rozdělit na **parametry vnitřní**, což jsou parametry vlastního systému a **parametry vnější**, tedy vlastnosti povrchů, od kterých se radarový signál odráží. K nim patří především geometrické a elektrické vlastnosti materiálů.

K vnitřním systémovým parametrům patří:

- vlnová délka (frekvence) použitého mikrovlnného záření
- polarizace použitého záření

- úhel dopadu (úhel pohledu) radarového paprsku
- azimut dopadajícího radarového paprsku ve smyslu jeho orientace vzhledem ke snímanému objektu

K vnějším parametrům náleží především:

- drsnost povrchu a lokální úhel dopadu
- vlhkostní poměry
- topografie
- dielektrické vlastnosti materiálů

Většina z výše uvedených parametrů působí na formování zaznamenaného radarového signálu ve svém komplexu a jsou často ve vzájemných přímých či nepřímých korelačních vztazích. Stejně jako v případě pasivního snímání v optické části spektra (viditelné a blízké infračervené záření), charakteristiky radarového echa jsou do jisté míry formovány také základními druhy povrchů - tedy takovými kategoriemi jako vegetační kryt, voda či půdy, horniny a minerály. Tyto jsou však výše uvedenými vnitřními a vnějšími parametry modifikovány do té míry, že podle práce CAMPBELLA (1996) v případě mikrovlnného aktivního snímání nelze hovořit o určitém spektrálním chování uvedených kategorií. Jednotlivé parametry ovlivňující výsledný radarový signál jsou zmíněny dále. Vlivy topografie a uspořádání tvarů snímaného reliéfu na výsledný radarový signál jsou uvedeny v části 5.3.

5.4.1 Vlnová délka

Základní **vlnové délky** nejužívanějších pásem pro přenos radarového signálu uvádí tabulka 5.1. Vlnová délka radarového signálu určuje, do jaké míry je signál zeslabován nebo rozptylován atmosférou. Atmosféra více ovlivňuje radarové signály s kratší vlnovou délkou do 3 cm, i když toto ovlivňování je ve srovnání s efekty atmosféry ve viditelném oboru spektra malé. Radarový signál není téměř ovlivňován oblačností, echo od silného deště však může být silné v kratších vlnových délkách. Toho je využíváno v meteorologii ke zjišťování oblastí s deštěm. Je využíváno vlnových délek pod 1 cm, echo signálu od dešťových oblastí je u 3 cm však zanedbatelné.

Většina radarových systémů pracuje s jedním pásmem mikrovlnného záření, i když některé experimentální systémy fungují jako „multispektrální“. Boční radary na letadlech nejčastěji využívají pásem L, C, K nebo X. Družicové systémy SAR pracují převážně v L a C pásmu (CAMPBELL 1996). Prostorové rozlišení je při dané délce antény nepřímo úměrné vlnové délce použitého signálu. Naopak delší vlnové délky jsou schopny lépe pronikat pod povrch půdy, hloubka tohoto pronikání však výrazně závisí na půdní vlhkosti (viz. dále). Pronikání mikrovlnného signálu pod povrch půdy či do vegetačního krytu závisí vedle vlnové délky také na úhlu dopadu signálu - při malém úhlu dopadu je pronikání intenzivnější.

Tab. 5.1 Základní charakteristiky používaných pásem mikrovlnného záření
(podle WILLIAMSE 1995)

Označení pásma	Vlnová délka (cm)	Frekvence (MHz)
Ka	0,75-1,1	40 000-26 500
K	1,1-1,67	26 500-18 000
Ku	1,67-2,4	18 000-12 500
X	2,4-3,75	12 500-8 000
C	3,75-7,5	8 000-4 000
S	7,5-15	4 000-2 000
L	15-30	2 000-1 000
P	30-100	1 000-300

5.4.2 Polarizace

Bez ohledu na vlnovou délku může být radarový signál vyslán a přijímán s různou polarizací. **Polarizaci signálu** definuje orientace vektoru elektrické vlny v rámci elektromagnetického záření. To znamená, že radarový signál může být filtrován tak, že jeho elektrická vlna kmitá pouze v jedné rovině kolmé ke směru šíření. V případě nepolarizovaného signálu kmitá elektrická vlna všemi směry. Radarový signál může být vyslán ve vertikální (V) nebo horizontální (H) rovině. To stejné platí o přijímaném signálu. Signál tedy může být přijímán a vyslán ve 4 režimech - HH, VV (shodná polarizace), HV, VH (rozdílná polarizace). Některé experimentální radarové systémy využívají i tzv. kruhové polarizace, kdy rovina elektrické vlny rotuje. Protože různá polarizace ovlivňuje odražený signál (echo), je vzhled obrazových záznamů vzniklých z různě polarizovaného signálu také různý. Porovnání dvou obrazových záznamů s různou polarizací (např. HV a HH) může odhalit povrchy, které způsobují tzv. **depolarizaci signálu**. Tyto povrchy se potom na obou snímcích jeví odlišně. Jak uvádí CAMPBELL (1996), depolarizace signálu může být významným nositelem informace o drsnosti povrchu, o specifických odrazových vlastnostech uvnitř vrstvy vegetace (tzv. **volume scattering**), či o pronikání signálu do vrstev sedimentů.

5.4.3 Úhel dopadu radarového signálu

Úhel dopadu radarového signálu je úhel, který svírá rovina snímaného povrchu s normálou vedenou v místě dopadajícího paprsku. V případě plochého terénu se rovná pohledovému úhlu a také je doplňkovým úhlem k úhlu hloubkovému (viz. obr. 5.3). Úhel, pod jakým radarový paprsek dopadá na snímaný povrch, výrazně ovlivňuje jak geometrii výsledného radarového obrazového záznamu (efekty zhuštění signálu a zpětného překryvu), tak také rozsah radarových stínů. Ty zabírají větší plochy snímku při velkých úhlech dopadu radarového signálu. S intenzitou radarového echa - tedy s radiometrickými vlastnostmi obrazového záznamu má vliv tzv. **lokální** úhel dopadu signálu (viz dále).

Radarový paprsek dopadající na snímaný povrch pod strmým úhlem způsobuje intenzivní odraz od relativně hladkých povrchů. Při velkém úhlu dopadu je echo radarového signálu naopak intenzivnější v případě relativně drsných povrchů. Velký úhel dopadu zdůrazňuje tvary snímaného reliéfu.

5.4.4 Azimut

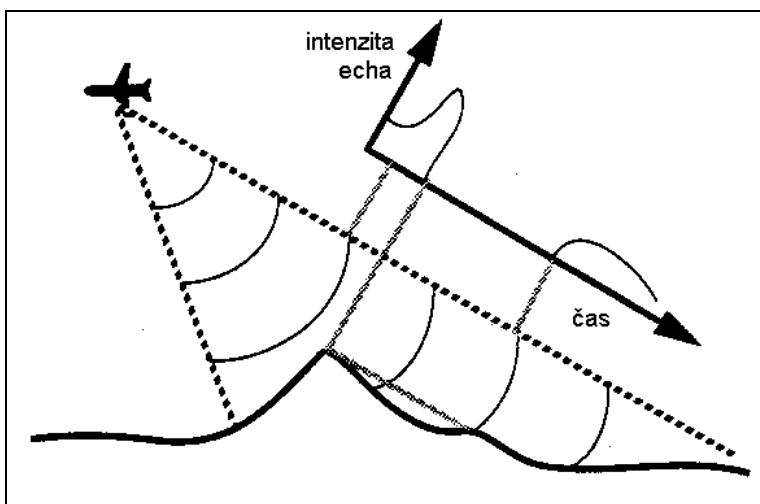
Azimut určuje vzájemnou orientaci dopadajícího radarového paprsku a snímaného objektu. Tato vzájemná orientace má výrazný vliv na vzhled výsledného snímku především u objektů uspořádaných do linií. Takovými jsou tedy například některé zemědělské plodiny, síť ulic v zastavěných plochách či některé geologické struktury. Dopadá-li radarový paprsek kolmo na uvedené liniové struktury, radarové echo je daleko intenzivnější, než je tomu v případě, kdy jsou linie uspořádány rovnoběžně se směrem dopadajícího paprsku. Radarový signál dopadající na stejný povrch pod různým azimutem může právě v závislosti na azimutu jevy či objekty na tomto povrchu zdůrazňovat nebo naopak potlačovat. Stejně jako v případě úhlu dopadu ovlivňuje azimut radarového paprsku samozřejmě i vznik radarových stínů a pozičních chyb ve výsledném obrazovém záznamu.

5.5 Charakteristiky zemského povrchu ovlivňující radarový signál

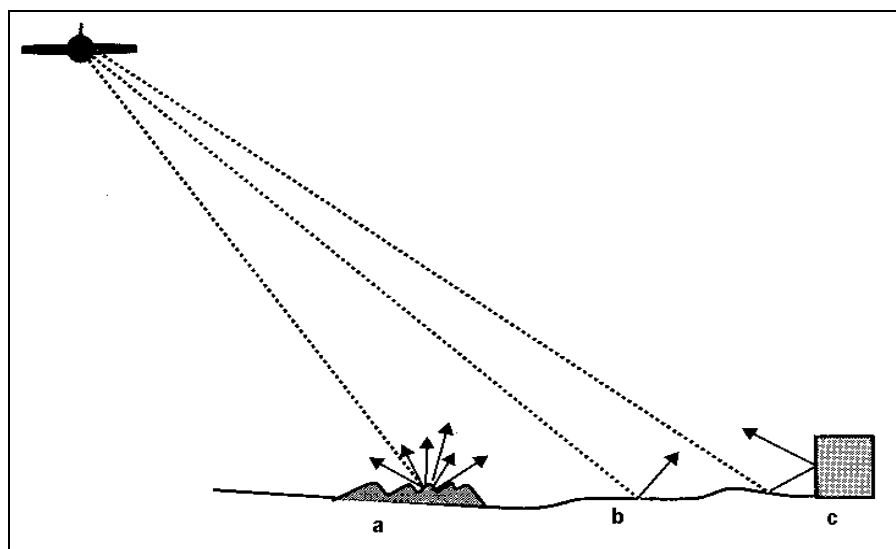
Radarový signál je vedle výše zmíněných charakteristik jako jsou vlnová délka, polarizace či úhel dopadu, ovlivňován řadou charakteristik zemského povrchu. Všechny tyto vlivy působí na intenzitu radarového echa od různých objektů. Empiricky bylo zjištěno, že echo od objektů na zemském povrchu je nejvíce modifikováno jejich geometrickými a elektrickými vlastnostmi (DALLEMAND et al. 1993).

5.5.1 Geometrické vlastnosti objektů

Lokální změny v orientaci objektů vůči dopadajícímu radarovému signálu výrazně ovlivňují intenzitu odraženého signálu (viz. obr. 5.12). **Lokální úhel dopadu** radarového signálu je úhel mezi dopadajícím radarovým paprskem a normálou k zemskému povrchu v místě dopadu paprsku. Kolísání v lokálním úhlu dopadu způsobuje silný odraz radarového signálu od povrchů orientovaných přibližně kolmo k dopadajícímu radarovému paprsku a naopak žádný odraz (tzv. radarový stín) od povrchů orientovaných od senzoru tak, že na ně radarový paprsek nedopadá (obr. 5.12).



Obr. 5. Chyba! Neznámý argument přepínače. Závislost lokálního úhlu dopadu radarového signálu na intenzitu radarového echa



Obr. 5. Chyba! Neznámý argument přepínače. Základní druhy odrazů radarového signálu v závislosti na drsnosti povrchu, a - difúzní odraz, b - zrcadlový odraz, c - koutový odraz

Intenzita radarového echa je také výrazně modifikována **drsností povrchu**. Drsnost povrchu je definována jako relativní veličina především s ohledem na použitou vlnovou délku radarového signálu. Podle DALLEMANDA et al. (1993) lze drsnost povrchu definovat tzv. Rayleighovým kritériem následovně:

jako **hladké** jsou definovány povrchy, pro které platí:
$$h < \frac{\lambda}{8 \cdot \cos \theta}$$

a jako **drsny** jsou definovány povrchy, pro které platí:
$$h > \frac{\lambda}{8 \cdot \cos \theta} ,$$

kde h - průměrná výška nerovností povrchu
 λ - vlnová délka radarového signálu
 θ - úhel dopadu

Naproti tomu CAMPBELL (1996) či KOLÁŘ a kol. (1977) vztahují míru drsnosti ne k průměrné výšce nerovností (h), ale např. ke směrodatné odchylce této průměrné výšky. Stejný povrch se tedy může v závislosti na vlnové délce použitého mikrovlnného záření chovat jako hladký či drsný. Toto může na jedné straně komplikovat rozpoznávání jednotlivých povrchů, na druhé straně však lze z radarového echa zjišťovat i takové charakteristiky jako vlnění či rychlost větru.

V závislosti na vlnové délce mikrovlnného záření se podle drsnosti rozlišují tři základní druhy odrazů (obr. 5.13). Jako tzv. **difúzní refraktory** odrážejí drsné povrchy - odrážejí dopadající energii ve všech směrech a podstatná část této odražené energie dopadá zpět na anténu radaru (obr. 5.13a). Povrchy, které lze označit jako hladké, odrážejí jako tzv. **zrcadlové refraktory** (obr. 5.13b). Tyto povrchy odrážejí většinu energie mimo dosah antény radaru. Výsledkem je velmi slabé echo. Existuje však i skupina přechodných refraktorů. Při hodnocení radarového echa musí být vedle drsnosti povrchu brány v úvahu také tvar a orientace objektů. Velmi silné echo způsobují tzv. **koutové refraktory** (5.13c). Silný odraz je způsoben dvojitým odrazem od dvou hladkých povrchů. Takovéto povrchy zaujímají na snímku obvykle pouze velmi malé plochy, jeví se na radarovém snímku jako velmi světlé plošky. V zastavěných oblastech může být velmi rozdílné echo od stejných povrchů v závislosti na orientaci ulic a zdí budov. Ke zvláštnímu druhu

odrazu může docházet u povrchů pokrytých vegetací. V tomto případě se radarový signál neodráží od povrchu, ale dochází k několikanásobnému **odrazu uvnitř vrstvy** vegetace (v korunách stromů, od kmenů či od vegetačního podrostu). Takovýto odraz z vrstvy (volume scattering) způsobuje například změny v polarizaci radarového signálu a může být nositelem informace.

Některé povrchy, jako například silnice, se mohou ve viditelném oboru spektra jevit jako difúzní refraktory, v mikrovlnné části spektra se však mohou chovat jako zrcadlové refraktory. Vzhledem k povaze radarového signálu obsahují radarové snímky daleko více zrcadlových refraktorů ve srovnání s fotografií.

5.5.2 Elektrické vlastnosti objektů

Mírou elektrických vlastností materiálů je tzv. **dielektrická konstanta**, která charakterizuje povrchy především z hlediska jejich schopností absorbovat, odrazet či vést mikrovlnnou energii. Elektrické vlastnosti objektů na zemském povrchu jsou těsně vázané na výše diskutované vlastnosti geometrické a obojí výrazně ovlivňují charakter radarového echa. Obecně platí, že vysoké hodnoty dielektrické konstanty způsobují vysoké hodnoty zaznamenaného odraženého signálu. To však platí v případě, že ostatní vlastnosti povrchu (například rozložení, velikost a počet jednotlivých částic, na kterých k odrazu dochází) považujeme za konstantní. Hodnoty dielektrické konstanty souvisí především s **obsahem vody**.

V mikrovlnné oblasti spektra má většina materiálů v suchém stavu hodnotu dielektrické konstanty v rozsahu 3 - 8. Na druhé straně voda má dielektrickou konstantu kolem 80. Přítomnost vody v půdě nebo ve vegetaci tak může výrazně zvýšit odraz radarového signálu. Ve skutečnosti změny v intenzitě radarového signálu jsou více ovlivňovány změnami ve vodním obsahu objektů než změnami v objektech samotných. Protože rostliny mají velký povrch a obvykle obsahují určité množství vody, dobře odrážejí mikrovlnnou energii. Vyšší vodní obsah snižuje možnost pronikání radarového signálu do půdy. Vysokými hodnotami dielektrické konstanty jsou charakterizovány především vodní plochy, kovové povrchy a vegetace, zatímco nízkými hodnotami naopak horniny, suchá písčité půda či led.

5.6 Radarový signál základních druhů povrchů

5.6.1 Radarový signál vegetace

Interakce radarového signálu s vegetací, která je obvykle tvořena mocnější vrstvou různých částí rostlin, je značně složitá. Je-li vlnová délka radarového signálu přibližně rovná průměrné velikosti jednotlivých částí rostlin, je zpětný odraz radarového signálu od vegetace intenzivní, zvláště je-li vegetace hustá. Obecně platí, že pro zjišťování vegetace jsou výhodné krátké vlnové délky kolem 2 až 6 cm, které se intenzivně odrážejí od listů. Obdělávaná pole a lesní komplexy se na radarových snímcích mohou v různých vlnových délkách jevit značně odlišně.

Vedle velikosti rostlin a vlnové délky je radarové echo ovlivňováno řadou dalších faktorů. Vegetace s vysokým vodním obsahem odráží daleko intenzivněji než vegetace suchá. HH a VV polarizovaný signál proniká vegetací daleko více než signál HV nebo VH polarizovaný. Více energie se odráží od plodin uspořádaných do řad rovnoběžných s dráhou letu. Množství odraženého signálu ovlivňuje také úhel dopadu radarového signálu.

5.6.2 Radarový signál vody a ledu

Hladké vodní plochy způsobují zrcadlový odraz radarového signálu, jehož výsledkem je nulové echo. Nerovná vodní plocha odráží různé množství radarového signálu. Experimenty na družici SEASAT prokázaly možnost zjišťovat vlny s vlnovou délkou více než 100 cm, výškou vlny více než 1 m při rychlostech větru přesahujících 2 m/sec (CAMPBELL 1996). Bylo také zjištěno, že vlny pohybující se v příčném směru (kolmo k dráze letu) mohou být zjišťovány daleko snáze, než vlny pohybující se v podélném směru.

Radarový signál odražený od mořského ledu závisí na jeho dielektrické konstantě a prostorovém uspořádání. Intenzita odraženého signálu je ovlivňována také stářím ledu, sněhovou pokrývkou, nerovnostmi povrchu, teplotou apod. Pásmo X a L bylo použito k zjišťování druhu ledu a jeho mocnosti. Pásmo L lze využít k odlišení různé barvy ledu v závislosti na jeho stáří a obsahu znečišťujících příměsí (LILLESAND a KIEFER 1994).

5.6.3 Radarový signál půdy

Protože dielektrická konstanta vody je asi desetkrát vyšší než dielektrická konstanta pro suchou půdu, radarem lze zjistit přítomnost vody v horní několikacentimetrové vrstvě půdy. Půdní vlhkost je zvláště zřetelná v delších vlnových délkách a zabraňuje pronikat radarovému signálu do větších hloubek. V extrémně suché půdě může radarový signál v pásmu L pronikat až do hloubky několika metrů.

5.7 Vzhled radarových obrazových záznamů

V důsledku bočního dopadu radarového paprsku na předměty na zemském povrchu má radarový snímek často vzhled černobílé fotografie pořízené při nízké výšce Slunce. Při interpretaci radarových snímků je však nutné vzít v úvahu výše zmíněné vzájemné efekty vlnové délky, drsnosti povrchů, polarizace, vlhkosti materiálu, typu odrazu apod. Obecně platí, že intenzivní echo je zaznamenáno od svahů orientovaných přibližně kolmo na dopadající radarový paprsek, od drsných povrchů, od objektů s vysokým vodním obsahem, od kovových objektů, od zastavěných ploch. Ty se tedy potom jeví jako světlé. Povrchy, které se chovají jako difúzní refraktory odrážejí průměrný signál a mohou způsobovat výraznou texturu na snímku. Slabý signál odrážejí povrchy, které se chovají jako zrcadlové refraktory - tedy například hladká vodní hladina, dlážděné povrchy, pláže. Žádný radarový signál není přijímán z oblastí radarových stínů.

Jedním z dominantních rysů na radarových obrazových záznamech je **topografie** snímaného terénu, která je zvýrazňována efekty radarových stínů, zpětného překryvu a zhuštění signálu. Jejich výsledkem je asymetrické znázornění svahů orientovaných k anténě a od antény. Svahy příkloněné k nosiči s anténou jsou znázorněny jako kratší, strmější a jsou také daleko světlejší než svahy odvrácené, které jsou podány naopak jako mírnější, než je tomu ve skutečnosti.

Vedle topografie se radarové obrazové záznamy vyznačují především svoji výraznou **texturou**. Jednou z jejích forem je výrazná zrnitá textura označovaná jako **speckle**. Někdy se označuje také jako textura "soli a pepře". Tento vzhled vyplývá z koherentní povahy radarového signálu, která způsobuje vznik světlých a tmavých náhodně rozmístěných bodů v obraze. Výrazná skvrnitá textura vzniká jako náhodný proces a není tedy výsledkem rozdílu v průměrné odrazivosti mikrovlnného signálu na ploše

sousedních pixelů, jako je tomu v případě pasivních metod snímání ve viditelné části spektra (NEZRY et al. (1991). Na snímaném povrchu se v ploše jednoho obrazového elementu může nacházet větší množství objektů, jejichž rozměr se blíží vlnové délce dopadajícího mikrovlnného signálu. Pokud se tyto několikacentimetrové objekty nacházejí v přesně stejné vzdálenosti od antény radaru, potom odraz radarového signálu od těchto elementů se bude násobit a výsledkem bude velmi intenzivní echo, které ve výsledném obrazovém záznamu vytvoří velmi světlý pixel. Jindy mohou zmíněné elementární refraktory v ploše pixelu vzájemně interferovat a radarové echo v zaznamenaném obraze vytvoří tmavý pixel. Uvedená zrnitá textura tvořící vysokofrekvenční šum radarových obrazových záznamů může být částečně potlačena při následném zpracování, nelze ji ale úplně odstranit.

Na druhé straně právě textura je často výrazným rozpoznávacím příznakem jednotlivých druhů povrchů či procesů na radarovém snímku. Textura je podle ČAPKA (1988) definována jako plošná tónová proměnlivost uvnitř obrazu. Je tvořena shodnými opakujícími se elementy, které je možné zjistit, ale nelze je interpretovat. I když v současné době existuje řada algoritmů, kterými lze popsat texturu v obraze a zautomatizovat tak do určité míry rozpoznávání jednotlivých druhů povrchů, úspěšnost těchto postupů nedosahuje úspěšnosti automatické klasifikace založené na teorii spektrálního chování.

5.8 Radarové systémy

Před vypuštěním prvních družic nesoucích SAR byl syntetický radar provozován také na letadlových nosičích. Výsledky dvou experimentů s názvem Convair SAR-580 (rok 1981) a AGRISAR (1986) zaměřených na testování možností radarových snímků pro nejrůznější aplikace shrnuje WOODING (1988). Základní parametry použitých radarových systémů v uvedených projektech shrnuje tab. 5.2

Uvedené projekty byly zaměřeny na zjišťování potenciálu radarových snímků pro diskriminaci jednotlivých druhů zemědělských plodin pomocí jediného snímku i časové řady několika snímků odrážejících studované plochy v různých fenologických fázích. Dále byly testovány také možnosti odlišení jednotlivých plodin v závislosti na použité vlnové délce mikrovlnného záření, různé polarizaci signálu apod. Radarových snímků z uvedených projektů bylo použito také pro lesnické účely, geologické a geomorfologické aplikace (detekce vulkanických tvarů reliéfu), hydrologický výzkum (odlišení ledu a sněhu) či oceánografii (mapování rozšíření mořského ledu).

Tab. 5.2 Základní parametry radarových systémů umístěných na letadlových nosičích a použitých v projektech Convair SAR-580 a AGRISAR, podle WOODINGA (1988)

SAR	nosič	výška letu	pásmo	polarizace	úhel dopadu	šířka záběru	datum
SAR 580	Convair	7 km	L, C, X	HH,VV,HV	25-65°	7 km	VI-VII/1981
Varan-S	B17	7 km	X	HH,VV	25-65°	10 km	V-VIII/1986

V současné době nabývají na významu především kosmické radarové systémy. První z nich byly systémy experimentální, od počátku 90. let jsou však na oběžnou dráhu uváděny systémy, které již poskytují značné množství obrazového materiálu pro komerční využití v nejrůznějších aplikacích.

5.8.1 SEASAT

SEASAT byla první družice navržená pro oceánografické účely. Byla vypuštěna v r. 1978 na subpolární dráhu o průměrné výšce 800 km. Systém pořizoval snímky s periodou 36 hodin střídavě ve dne a v noci a pokryl 95 procent plochy světového oceánu (CAMPBELL 1996). Systém však byl funkční pouze 99 dní. Radar používal ke snímání pásmo L (23,5 cm) s HH polarizací. Vytvářel snímky z pásu širokého 100 km při pohledovém úhlu od 20 do 26 stupňů a rozlišení 25 metrů v příčném i podélném směru.

Přestože hlavním účelem vypuštění SEASAT bylo monitorování vlnění a mořského ledu, snímky byly použity v řadě dalších aplikací, jako v geologii, mapování vodních zdrojů, mapování druhů povrchů a aplikacích v zemědělství. Snímky dávají mnoho informací také o reliéfu mořského dna, o poloze pískových lavic či o změnách jejich polohy, o rozložení polárního ledu i o jeho vlastnostech - například o jeho stáří. Světlejšími odstíny je zaznamenán starší led, který má hrubší povrch, na němž se mohou vyskytovat úlomky hornin. Tmavými tóny jsou znázorněny nový led a volná vodní hladina. Informace o projektu podává například BORN (1979)

Také v geologii bylo radarových obrazových záznamů z družic použito v řadě aplikací. Radarové snímky z kosmu totiž nemají problémy se změnami úhlu dopadu, který se u snímků z letadel (z nižších výšek) značně mění ve směru kolmém k dráze letu a způsobuje změny ve vzhledu terénních tvarů. Úhel dopadu se u družicových snímků mění pouze nepatrně, snímky však obsahují geometrické distorze v důsledku zpětného překryvu v horských oblastech. Tyto nepřesnosti jsou menší u snímků pořízených s velkým úhlem dopadu, jenž zvýrazňuje drsnost povrchů, avšak prodlužuje radarové stíny.

Další informace o radarových snímcích pořízených družicí SEASAT lze získat na adrese <http://southport.jpl.nasa.gov/scienceapps/seasat.html>. Radarových snímků z družice SEASAT bylo použito v řadě nejenom oceánografických aplikací. Příklady použití pro určování povrchové teploty oceánu (SST), výparu, rychlosti větru apod. Lze nalézt na adrese <http://rainbow.ldeo.columbia.edu/data/NASAentries/nasa3315.html>

5.8.2 SIR - Radar na amerických raketoplánech

Na amerických raketoplánech byly postupně od počátku 80. let v provozu tři systémy SAR. I když sloužily především pro experimentální účely, představují bohatý obrazový materiál, kterého bylo využito v řadě aplikací.

Snímky SIR-A (SIR - Shuttle Imaging Radar) byly pořízeny z raketoplánu z výšky 260 km během listopadu 1981. Mnoho parametrů tohoto systému bylo stejných jako v případě SEASAT. Hlavním rozdílem je to, že SIR-A snímal zemský povrch s větším obrazovým úhlem (47-53 stupňů). Opět bylo použito L pásma s HH polarizací. Záběr byl široký 50 km a rozlišovací schopnost 40 m v obou směrech.

Systém SIR-B pořizoval obrazové záznamy z raketoplánu v říjnu 1984. Bylo použito opět L pásma s HH polarizací. Hlavní rozdíl oproti SIR-A byl, že systém SIR-B mohl mechanicky měnit obrazový úhel od 15 do 60 stupňů. To umožňovalo především pořizovat stereoskopické dvojice snímků. Podélné rozlišení bylo 25 metrů, příčné rozlišení se podle obrazového úhlu pohybovalo od 14 do 46 metrů.

Systém SIR-C/X byl na raketoplánech poprvé funkční ve dvou etapách v roce 1994 a potom v následných letech. Jak je zřejmé z označení tohoto systému, šlo o systém pracující na více frekvencích (L pásmo s průměrnou vlnovou délkou 23,5 cm a C pásmo

s vlnovou délkou 5,7 cm) a také s různě polarizovaným signálem (HH, VV, HV, VH). Nastavitelný obrazový úhel mohl nabývat hodnot v intervalu 15 až 60 stupňů. Obrazové záznamy z SIR-C jsou dále charakterizovány podélným rozlišením 25 metrů a příčným rozlišením 14 až 46 metrů v závislosti na úhlu dopadu signálu. Šířka záběru během jednoho přeletu i výška letu měla jako u předchozích systémů hodnoty 50 resp. 260 km.

Velmi rozsáhlou databázi radarových obrazových záznamů z SIR-C/X lze nalézt na adrese <http://www.jpl.nasa.gov/sircxsar>. Zde se nachází snímky z celého světa z různých letů raketoplánu. Každá obrazová informace je dále doplněna vysvětlujícím textem

Radarové obrazové záznamy z SIR velmi dobře prezentují možnosti získávat informace také z určité hloubky pod povrchem. Především v závislosti na použité vlnové délce a vlhkosti může signál pronikat i sedimenty do hloubky několika metrů a může tak detekovat například síť dávných vodních toků nebo štěrkových teras

5.8.3 Almaz-1

Předchůdcem družice ALMAZ-1 byla družice KOSMOS 1870 vypuštěná v roce 1987, která za dva roky fungování pořídila značné množství radarových snímků pevniny i oceánu. Její následník - družice ALMAZ-1 byla první komerční družice nesoucí SAR. Byla uvedena na oběžnou dráhu v bývalém Sovětském Svazu v roce 1991. Družice byla funkční asi po 18 měsících. Pohybovala se ve výšce 300 km (později 360 km) mezi 73 stupni S a J zeměpisné šířky. V závislosti na zeměpisné šířce poskytovala družice snímky s časovým rozlišením jednoho až tří dny.

SAR operoval v S pásmu s vlnovou délkou 10 cm s HH polarizací. Obrazový úhel se pohyboval od 30 do 60 stupňů a prostorové rozlišení od 10 do 30 metrů. Družice snímala dva pruhy 350 km široké vlevo a vpravo od dráhy letu.

5.8.4 ERS-1, ERS-2

První družice ERS-1 byla vypuštěna Evropskou kosmickou agenturou (ESA) v roce 1991. Družice se pohybuje na subpolární dráze ve výšce 785 km. Stejně místo na Zemi snímá po 16 až 18 dnech.

Družice je polyfunkční a nese tři základní instrumenty: 1) tzv. AMI (Active Microwave Instrument), což je SAR pracující v C pásmu, 2) Radarový altimetr (výškoměr) pracující v Ku pásmu, 3) podélně skenující infračervený radiometr.

Zařízení AMI může v každém okamžiku pracovat v jednom ze tří režimů: IMAGE, WAVE a WIND. V režimu IMAGE pořizuje obrazový záznam z pásu širokého 100 km s rozlišením zhruba 30 m, s VV polarizací a se středním obrazovým úhlem 23 stupňů. V režimu WAVE instrument měří odrazivost od povrchu oceánu ovlivněnou vlněním. V neobrazovém režimu WIND jsou měřeny směr a rychlost větru při hladině moře.

Ve srovnání s předchozími systémy ERS-1 operuje v kratších vlnových délkách (C pásmo), s VV polarizací a s relativně strmým úhlem dopadu radarového signálu. Z těchto důvodů mají snímky z ERS-1 poněkud odlišný vzhled ve srovnání s jinými systémy SAR. Velmi dobře je na nich znázorněn i málo členitý reliéf.

V roce 1994 byla vypuštěna družice ERS-2, jejíž technické vybavení pro snímání zemského povrchu i parametry oběžné dráhy jsou stejné jako v případě ERS-1. Obě družice byly na své subpolární dráze posunuty a po určitou dobu operovaly v tzv.

tandemu. Nasnímaná data z obou družic mají velký význam pro interferometrická měření výšek (viz dále).

Na obrazových záznamech ERS lze dobře interpretovat například zavlažovací systémy. Větší vodní obsah zavlažovaných plodin zvyšuje dielektrickou konstantu, což ovlivňuje odrazivost povrchů. Zavlažované plochy se jeví jako světlé vůči svému okolí. Listy s vysokým vodním obsahem odrážejí radarový signál intenzivněji než listy suché. Také větší drsnost povrchu způsobuje větší odraz.

Záznamy z hornatých oblastí vykazují efekt zpětného překryvu v důsledku strmého úhlu dopadu signálu. Dobře jsou zjistitelné nově odlesněných povrchy, protože odlesněním se mění drsnost povrchu. Ve srovnání se zalesněnými oblastmi jsou odlesněné povrchy "hladké" a jeví se tedy na snímcích jako tmavší. Tyto plochy lze často identifikovat také podle pravidelných tvarů. Na radarových záznamech z ERS lze dobře sledovat také vlnění - např. tzv. vnitřní vlny, které vznikají na styku dvou vodních mas odlišných vlastností (např. rozdílná salinita).

Voda se na snímcích jeví obecně jako světlejší v případě, že její povrch je drsnější v důsledku vlnění. V případě, že do větší vodní plochy ústí řeka, která má odlišnou teplotu, je na snímcích také dobře viditelná. Dobře identifikovatelné jsou také ropné skvrny. Olejový film na hladině tlumí vlnění a hladší hladina se pak jeví jako tmavší v důsledku zrcadlového odrazu. Značné množství materiálů o družicích ERS distribuuje evropská kosmická agentura, spoustu z nich včetně výukových materiálů a ukázek snímků lze získat především na serveru <http://tracy.esrin.esa.it:8001>

5.8.5 JERS-1

Jde o japonskou družici vypuštěnou v r. 1992. Nese vedle dvou optických senzorů (OPS) také SAR pracující v L pásmu s HH polarizací. Radar má 18 metrů prostorové rozlišení s šířkou záběrů 75 km při obrazovém úhlu 35 stupňů. Družice se pohybuje na subpolární dráze ve výšce 568 km. Snímky stejné oblasti lze obdržet po 44 dnech. Obrazové záznamy z družice JERS nacházejí uplatnění především při monitorování mořského ledu, studiu vodních objektů, zemědělských, lesnických či hydrologických aplikacích. Stereoskopických dvojic se hojně využívá v geologických aplikacích.

Na radarových záznamech JERS se sněhem pokryté horské oblasti jeví jako tmavé, také vodní plochy jsou velmi tmavé. Světlejší jsou lesnaté a urbanizované oblasti. Blíže k systému družic JERS např. <http://hdsn.eoc.nasda.go.jp/guide/homepage.html>.

5.8.6 RADARSAT

RADARSAT je první kanadskou družicí pro dálkový průzkum Země, která byla vypuštěna v listopadu 1995. Družice se opět nachází na subpolární oběžné dráze v průměrné výšce 798 km s inklinací 98,6. Družice poskytuje běžně obrazové záznamy stejného území jedenkrát za 24 dní. Systém však dovoluje pracovat v modu, ve kterém pořizuje obrazové záznamy polárních oblastí denně a záznamy oblastí mírných šířek každé tři dny.

Družice nese radarový systém SAR pracující v C pásmu (5,6 cm) s HH polarizací. Systém může pracovat v několika režimech s různou šířkou záběru (od 45 do 510 km), s různým obrazovým úhlem (10 až 60 stupňů) a různou prostorovou rozlišovací schopností. Prostorové rozlišení v podélném směru dosahuje hodnoty 9 metrů, v příčném směru 11 metrů. Ze záznamů lze vytvářet stereoskopické dvojice.

Hlavní oblasti aplikací zahrnují identifikaci ledu, výzkum pobřežních zón, mapování druhů povrchů (land cover), monitorování jevů v lesnictví a zemědělství. Snímky jsou poskytovány téměř v reálném čase, čehož se využívá v některých navigačních systémech. Další aplikace zahrnují identifikaci ropných skvrn, mapování prostorového rozšíření sněhové pokrývky, měření půdní vlhkosti či výzkum vlnění.

Informace o projektu RADARSAT lze získat mimo jiné také na této adrese:

<http://adro.radar1.sp-agency.ca.adrohomepage.html>

5.9 Další techniky získávání geografické informace prostřednictvím radaru

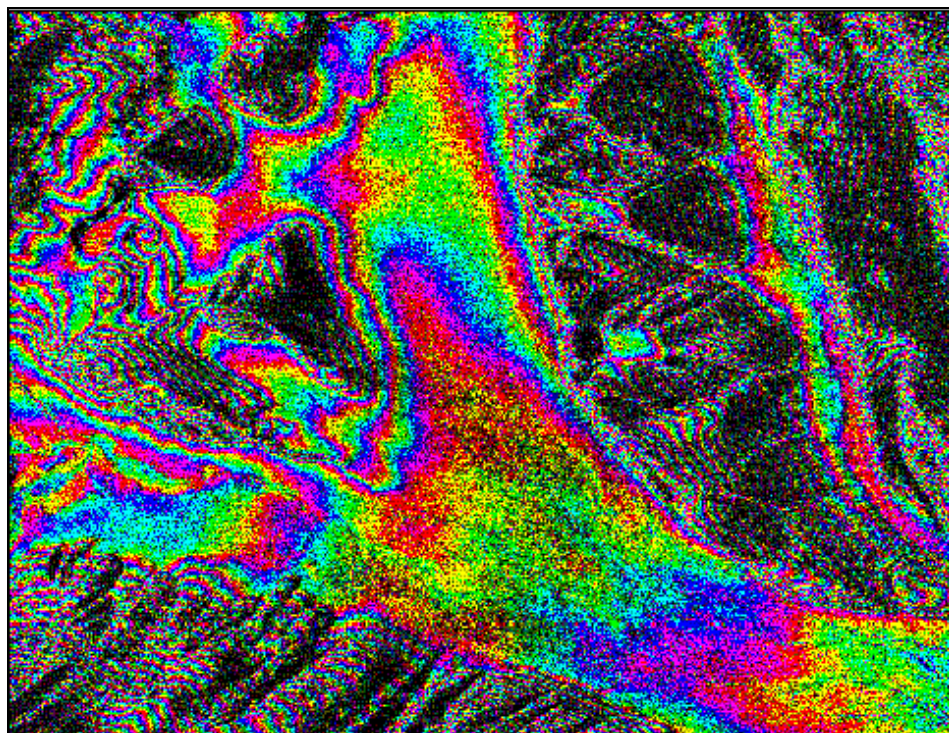
Vedle výše zmíněných obrazových dat nabízí aktivní radarové systémy řadu dalších produktů, z nichž lze získávat velmi specifické informace - například měřit směr a rychlost větru, půdní vlhkost či sestavovat velmi přesný model terénu. Některé z těchto technik jsou zmíněny dále.

5.9.1 Interferometr

Vzhledem k geometrii pohledu SAR je možné získat radarové echo stejného místa z různých částí dráhy družice. Dva radarové signály získané pro jedno místo tímto způsobem se budou lišit svoji fází. Právě tento rozdíl (**interference**) fází může být nositelem informace o výšce daného místa (WILLIAMS 1995). **Interferometrie** je potom metoda přesných výškových měření na základě rozdílů ve fázi dvou radarových signálů získaných z odlišné pozice

Celý systém může fungovat v různých konfiguracích. Dané místo může být snímáno nejen jedním radarem ze dvou sousedních drah, ale i dvěma radarovými systémy umístěnými na dvou družicích (tandem - ERS-1 a ERS-2). Je ale možný i způsob, kdy jeden nosič (družice i letadlo) může mít jeden radar a dvě přijímací antény umístěné ve známé vzdálenosti od sebe. Jedním z výše uvedených systémů lze tedy obdržet dva radarové obrazové záznamy. Zpracováním korespondujících obrazových prvků lze získat tzv. **interferogram** (obr. 5.14). Z něho lze na základě rozdílů ve fázi zjistit relativní výškové rozdíly jednotlivých prvků obrazu. Tyto lze poté převést na nadmořské výšky terénu a sestavit tak digitální model terénu (DTM). Zmíněný způsob generování DTM je oproti fotogrammetrickým postupům velmi rychlý, levný a poměrně velmi přesný. Přesnost se ve vertikálním směru pohybuje řádově v jednotkách metrů (4-5 m) (DALLEMAND et al. 1993).

Daleko přesnější technikou je potom tzv. **diferenční interferometrie**, založená na rozdílu dvou interferogramů. Tímto postupem lze zjišťovat řádově centimetrové výškové rozdíly, ke kterým došlo v čase mezi pořízením obou interferogramů (COULSON 1994). Tato metoda má velkou budoucnost v takových aplikacích jako je detekce sesuvů, zemětřesných pohybů, ale také například měření výšky vodní hladiny či mocnosti sněhové pokrývky.

Obr. 5.Chyba! Neznámý argument přepínače. Příklad interferogramu

Vedle družicových systémů poskytujících interferometrická měření, se ve světě používá několik systémů umístěných na letadlech. Systém **TOPSAR** (Topographic SAR) - využívá k interferometrickým měřením radaru umístěného na letadle DC-8. Radar pracuje v C pásmu (6 cm), odražený radarový signál je přijímán na dvou anténách umístěných 2,6 metru od sebe. Tento systém produkuje DTM s vertikální přesností 1 až 3 metry v závislosti na komplexitě terénu, s horizontální přesností 5 až 10 metrů a to z plochy 10 x 50 km. Celý systém je doplněn systémem GPS pro geometrické transformace a mozaikování jednotlivých interferogramů. Na podobném principu by měl pracovat systém dvou družicových nosičů TOPSAT, které budou pracovat v tandemu a to v L-pásmu (25 cm). Jimi produkovaný model terénu by měl dosahovat vertikální přesnosti 2 až 5 metrů při rozměru pixelu cca 30 metrů.

IFSARE je americký systém pracující na letadle LearJet36. Sestává se z radaru pracujícího v X-pásmu a dvou anténních systémů. Pro zvýšení geometrické přesnosti produkovaných dat je celý systém vybaven diferenčním GPS a laserem. Nosič se pohybuje ve výšce kolem 12 km a snímá území o šířce 10 km s rozlišením 2,5 metrů. Výsledný DTM dosahuje vertikální přesnosti pod 3 metry a slouží mimo jiné také k tvorbě ortofotomap.

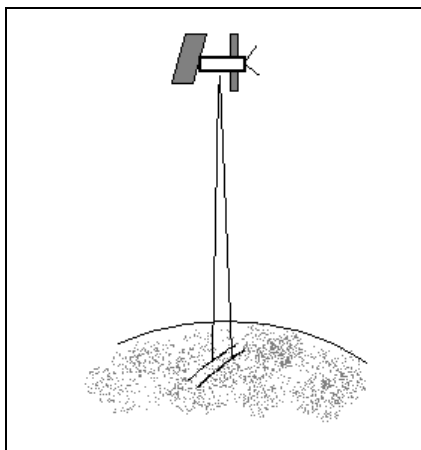
Ze současných družicových systémů poskytují data pro interferometrii například evropské družice ERS 1 a 2, vybavené stejnými přístroji se stejným pracovním režimem, které snímají zemský povrch s časovým posunem jednoho dne, nebo kanadský RADARSAT.

Současné možnosti využití interferometrie uvádí např. COULSON (1996). Patří sem především následující oblasti využití: tvorba digitálního modelu terénu, morfometrická analýza a topografické mapování, tvorba družicových ortofotomap, tématické mapování, zjišťování časových změn, geologické a hydrologické aplikace, výzkum kryosféry, regionální plánování apod. Například MÜSCHEN et al.(1996) použili radarových

snímků z ERS 1 a 2 a interferometrických měření k monitorování průběhu a následků vulkanické erupce pod ledovcem Vatnajökull na Islandu.

5.9.2 Výškoměr (Altimetr)

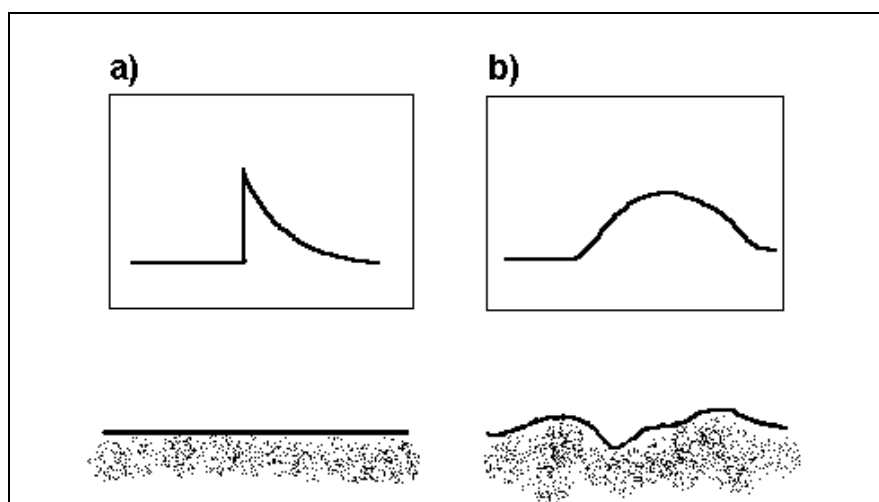
Altimetr je zařízení využívající toho, že radarová měření jsou ve své podstatě také měřeními vzdálenosti. Radarový altimetr pracující na družici ERS-1 operuje v Ku pásmu (obr. 5.15). Krátký intenzivní signál je vyslán z nosiče kolmo k zemskému povrchu a je měřen čas, za který se signál vrátí zpět k anténě umístěné na nosiči a stejně jako u zobrazujícího radaru je také zaznamenána změna signálu. Radarové echo je zaznamenáno jednak jako časový interval mezi vysláním a přijetím signálu a jednak jako signál modifikovaný povrchem, od něhož se signál odrazil. Protože se mikrovlnné záření šíří konstantní rychlostí, je možné z časového intervalu mezi vysláním a přijetím signálu zjistit vzdálenost, v tomto případě tedy výšku nosiče nad odražejícím povrchem. Při známých parametrech orbity lze tedy zjistit absolutní výšku povrchů. Intenzita odraženého a ntenou zachyceného signálu po časovém intervalu postupně narůstá, dosahuje svého maxima a potom opět postupně klesá. Intenzita přijatého echa tvoří tzv. **křivku intenzity signálu** (obr. 5.16). Z tvaru této křivky lze potom získat informaci nejen o výšce daného povrchu, ale také o jeho odrazových vlastnostech a drsnosti. Vzhledem k vlastnostem, které formují radarové echo se altimetrů využívá především k měření výšky hladiny oceánů a k měření výšky povrchů pokrytých ledem. Z charakteristik drsnosti vodních ploch lze získat poměrně přesné informace o vlnění - například o výšce vln a jejich rychlosti, dále o rychlosti větru, o slapových jevech, o mořských proudech atp. Přesnost výškových měření může být v některých případech lepší než 10 cm.



Obr. 5. Chyba! Neznámý argument přepínače. Schéma radarového altimetru

Vedle výše zmíněných aplikací lze výsledků měření altimetrem využít také ke zjišťování mocnosti vodního sloupce a k batymetrickým měřením. Např. KNUDSEN a ANDERSEN (1996) uvádějí základní postup, který vedl k sestavení map dna světového oceánu právě na základě měření výškoměrem umístěným na družici ERS-1. Celý proces generování topografie mořského dna je založen na těsné korelaci mezi batymetrií a anomáliemi gravitačního pole, které lze získat z měření altimetrem. Topografii dna světového oceánu vytvořenou na základě altimetrických měření lze získat na serveru GLIS (Global Land Information System) na adrese <http://edcwww.cr.usgs.gov/Webglis> a to s krokem 7,5 stupně. Z altimetrických měření družice GEOSAT byla sestavena také družicová mapa výškových poměrů Antarktidy (MANTRIPP et al. 1992). Mapa byla sestavena na základě více než 2 milionů měření

výškoměrem a je charakterizována prostorovým rozlišením zhruba 7 km. Výškové poměry jsou zatíženy chybou v řádu jednotek metrů. Podobná mapa výškových poměrů Antarktidy byla sestavena z altimetrických měření družice ERS-1 (RIDLEY et al. 1992).



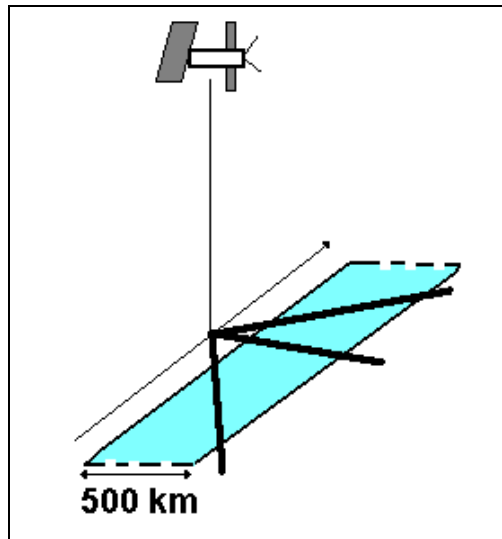
Obr. 5. Chyba! Neznámý argument přepínače. Tvar křivky intenzity signálu pro hladký (a) a drsný (b) povrch

5.9.3 Rozptyloměr (Skaterometr)

Skaterometr je zařízení, kterým lze měřit například rychlost a směr větru na hladině oceánu, ale i řadu velmi specifických veličin na povrchu souše - například půdní vlhkost apod. Měření je založeno na kvantifikaci rozptylu intenzivního mikrovlnného signálu odraženého od zemského povrchu. Nad hladinou oceánu je tento rozptyl způsoben především vlněním a je úměrný směru a rychlosti větru. Vítr způsobuje vlnění mořské hladiny, čímž se zvyšuje její drsnost, a tedy i intenzita odraženého signálu. Schéma skaterometru uvádí obr. 5.17.

Na družici ERS-1 je skaterometr tvořen systémem tří antén, z nichž dvě jsou orientovány pod úhlem 45 stupňů před a za družicí a jedna kolmo k dráze letu. Jednotlivé antény přijímají radarový signál z pruhu širokého 500 km. Syntézou uvedených tří radarových signálů lze tedy získat informaci o směru a rychlosti větru na hladině moře. Skaterometr pracuje s poměrně hrubým prostorovým rozlišením (cca 45 km). Rychlost větru lze zjišťovat v intervalu 4 až 24 m/s s přesností 10 %, směr větru s přesností asi 20 %.

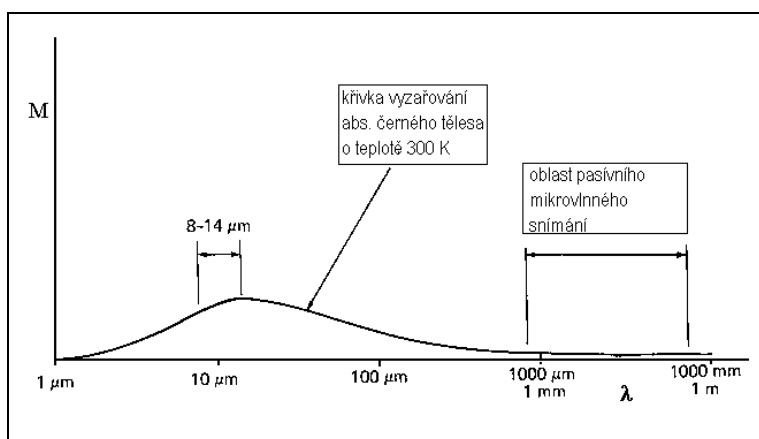
Použití rozptyloměru na družicích ERS pro analýzu vlhkosti půdy a možnosti předpovědi ohrožení suchem uvádí WAGNER et al. (1996). Značně omezené prostorové rozlišení (50 x 50 km) umožňuje použít tato data pouze v regionálním měřítku, jak uvádí citovaný autor údaje mohou být cenné především pro modelování možné globální klimatické změny. BOEHNKE a WISMANN (1996) využili měření ze skaterometru umístěného na družici ERS-1 ke studiu dynamiky permafrostu v severních oblastech asijského kontinentu.



Obr. 5. Chyba! Neznámý argument přepínače. Schéma skaterometru

5.10 Pasivní mikrovlnné snímání

Pasivní mikrovlnné systémy měří přirozenou dlouhovlnnou energii vyzářenou z objektů na zemském povrchu. Systémy pracují na stejném principu jako termální radiometry a skenery. Příjímacím zařízením je v tomto případě anténa. Většina pasivních systémů pracuje v kratších vlnových délkách mikrovln. Ze základních zákonů záření plyne, že tyto systémy pracují v oblasti spektra, ve které je množství emitované energie přirozeně velmi malé (obr. 5.18) a mikrovlnný signál se skládá ve skutečnosti z několika komponent - z emitovaného, transmitovaného a reflektovaného záření. Intenzita naměřeného mikrovlnného signálu určitého objektu tedy není jen funkcí jeho teploty a množství dopadajícího záření, ale také jeho schopnosti vyzařovat, vést či odrážet elektromagnetickou energii. Tyto charakteristiky jsou formovány elektrickými, chemickými i fyzikálními vlastnostmi objektů, také však geometrií snímání apod.



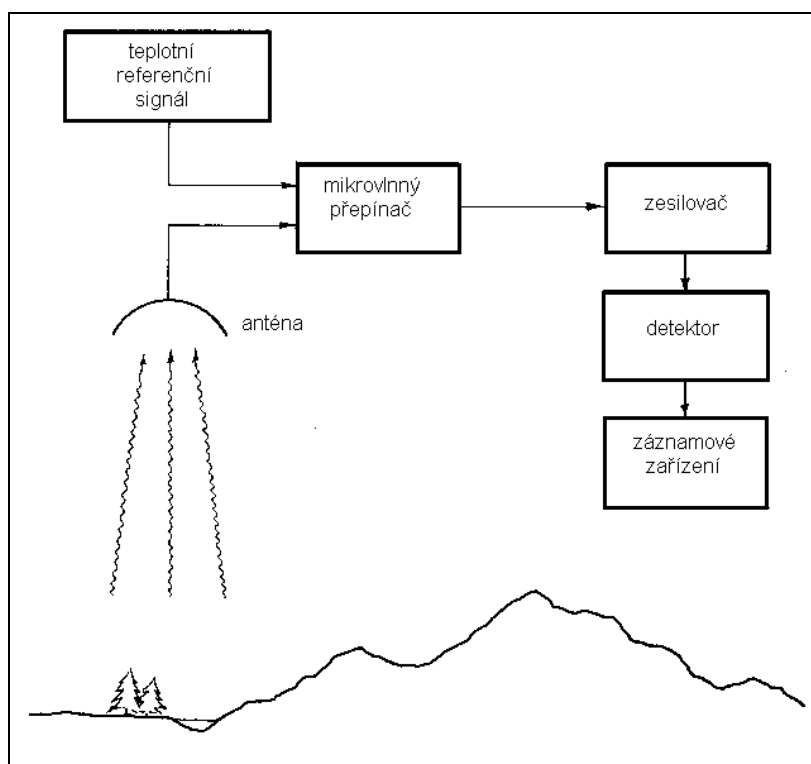
Obr. 5. Chyba! Neznámý argument přepínače. Intenzita elektromagnetického záření (M) v mikrovlnné části spektra

V důsledku všech výše uvedených vlivů má měřený signál vždy velký podíl šumu a jeho interpretace je obtížnější. Přesto se pasivních mikrovlnných systémů využívá v řadě

aplikací od měření teplotních profilů atmosférou až po zjišťování charakteristik svrchní vrstvy půdy, vodního a minerálního obsahu. Systémy pracují na letadlech i družicích.

5.10.1 Mikrovlnný radiometr

Základní konfigurace mikrovlnného radiometru je na obr. 5.19. Anténa zachycuje mikrovlnnou energii ze zemského povrchu. Mikrovlnný přepínač umožňuje rychlé přepínání mezi anténním signálem a referenčním kalibračním teplotním signálem. Oba signály jsou porovnávány a jejich rozdíl je elektronicky zaznamenáván. Pro všechny radiometry je typický nepřímý vztah mezi šířkou anténního signálu a sensitivitou systému. V důsledku velmi nízké úrovně mikrovlnného signálu je nutný velmi široký paprsek, aby zaznamenal dostatečně velký signál, který by byl měřitelný. V důsledku toho jsou pasivní mikrovlnné radiometry charakterizovány nízkou prostorovou rozlišovací schopností. Nezobrazující radiometry měří elektromagnetickou energii v profilech územím. Výstupní signál lze zaznamenávat v analogové i digitální podobě. K interpretačním účelům je záznam často doplňován fotografií snímaného území.



Obr. 5. Chyba! Neznámý argument přepínače. Schéma pasivního mikrovlnného radiometru.

Podle LILLESANDA a KIEFERA (1994)

Skenující (zobrazující) mikrovlnný radiometr vytváří obrazový záznam. Anténa je orientována kolmo k dráze letu, skenování může být prováděno elektronicky, mechanicky nebo sérií antén. Snímky mají vzhled podobný termálním záznamům, avšak světlé plochy jsou radiometricky "chladné" a tmavé naopak "teplé". Takovéto záznamy mohou dávat cenné informace například o půdní vlhkosti.

5.10.2 Aplikace pasivních mikrovlnných systémů

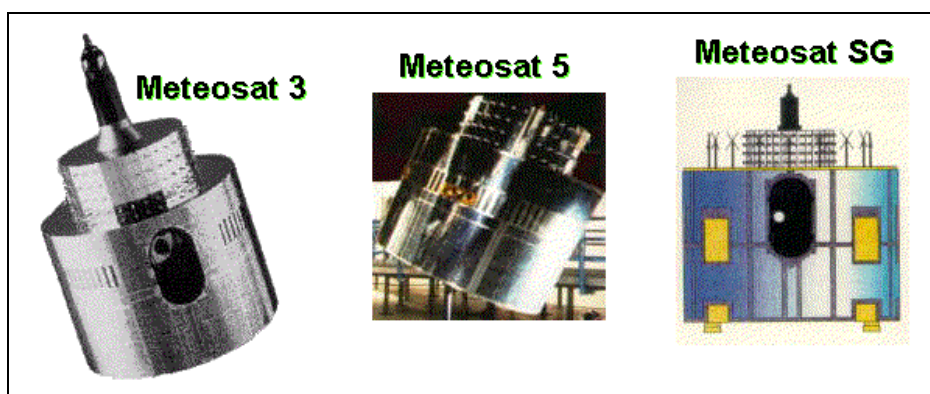
Metodika interpretace pasivních mikrovlnných obrazových záznamů se v současné době teprve formuje, již nyní jsou však zřejmé některé nesporné výhody tohoto typu dat. Tyto systémy mohou stejně jako radar pracovat ve dne i v noci a za jakéhokoliv počasí. Výběrem vhodných vlnových délek lze zařízením získat informace buďto o atmosféře, anebo se "dívat" skrze ni na zemský povrch. V důsledku selektivního pohlcování v mikrovlnné části spektra (především vodní parou a kyslíkem) existuje v této části spektra mnoho atmosférických oken. V meteorologii jsou těmito systémy měřeny například teplotní profily atmosférou, vodní obsah, obsah ozónu apod. Velké uplatnění mohou najít tyto snímky také v oceánografii při monitorování mořského ledu, proudů, směru a rychlosti větru a při detekci ropného znečištění. V hydrologii mají velký význam pro zjišťování průběhu tání sněhu, teploty půdy a půdní vlhkosti. Jsou omezeny malým prostorovým rozlišením. Pomocí těchto obrazových záznamů lze zjišťovat také charakteristiky jevů a objektů pod svrchní vrstvou půdy. Mnoho aplikací mají v geologii. Lze je využívat i v multispektrálním módu.

6. Přehled vybraných družicových systémů

6.1 Geostacionární meteorologické družice

Geostacionární meteorologické družice tvoří systém družic, který byl vyvinut z družic komunikačních v druhé polovině 60. let. Jde o družice pohybující se po rovníkových drahách ve výšce zhruba 36 000 km nad zemským povrchem s dobou rotace 24 hodin. Celý systém ukazuje obr. 3.7 a je v současné době tvořen americkými družicemi GOES (GOES 8 je umístěna na 75 stupni západní délky a GOES 9, která operuje na 135 stupni západní délky), japonskou družicí GMS 5 - Himawari (140 stupňů východní délky) a evropskou družicí METEOSAT (Greenwichský poledník). Centrální Asii a Indický oceán pokrývají jednak ruská družice ELEKTRO (též označovaná zkratkou GOMS) operující na 76 stupni východní délky a jednak indická geostacionární družice INSAT. Funkčnost i možnosti získávání dat z obou posledně jmenovaných družic jsou omezené. Systém geostacionárních družic doplňuje první čínská družice Fengyun - 2, umístěná na 105 stupni východní délky. Jednotlivé družice celého systému se tedy vyznačují velmi podobnými technickými parametry jak z hlediska dráhy družice a geometrie vytváření obrazových záznamů, tak z hlediska instalovaných snímacích zařízení a charakteru dat, která jsou systémem poskytována. Charakter poskytovaných dat - na jedné straně omezené prostorové rozlišení, a na druhé straně monitorování zemského povrchu s frekvencí 30 minut - determinuje jejich použití. Hlavní skupinou aplikací, ke které jsou data z geostacionárních družic určena, je synoptická meteorologie - tedy krátkodobé předpovědi počasí. Využití dat z geostacionárních družic se však neomezuje pouze na oblast meteorologie a klimatologie. Družice jsou významnou součástí varovných systémů před extrémními meteorologickými a hydrologickými jevy, své využití nacházejí i v oblastech rybolovu, zemědělství či lesnictví. Vzhledem k podobnosti jednotlivých družic i jimi poskytovaných dat jsou v další části uvedeny pouze základní informace o evropské družici METEOSAT.

6.1.1 Charakteristika družic METEOSAT



Obr. 6. Chyba! Neznámý argument přepínače. Družice METEOSAT

Družice METEOSAT se nacházejí na nultém poledníku (nad Guinejským zálivem) a ve svém zorném poli mají především Evropu, Afriku a přilehlé části Atlantického a Indického oceánu. Celý projekt řídí 16 evropských států sdružených v organizaci EUMETSAT, provoz celého systému řídí ESA (European Space Agency - evropská kosmická agentura). Od počátku 70. let bylo vypuštěno již 6 družic tohoto systému. V současné době jsou družice 1 až 4 již nefunkční, plně funkční je nyní družice

METEOSAT 5 a jako záložní byla na oběžnou dráhu vypuštěna družice METEOSAT 6. Po roce 2000 by tato série družic měla být nahrazena novou generací METEOSAT SG (Second Generation). Jak je zřejmé z obr. 6.1, družice má tvar válce. Jeho poloměr je 2,1 m a výška přibližně 3,2 m, družice váží 320 kilogramů. Na své orbitě družice rotuje kolem vlastní osy, která je přibližně rovnoběžná s osou rotace Země. Data jsou z družice na Zemi přenášena na frekvenci 1670-2110 MHz.

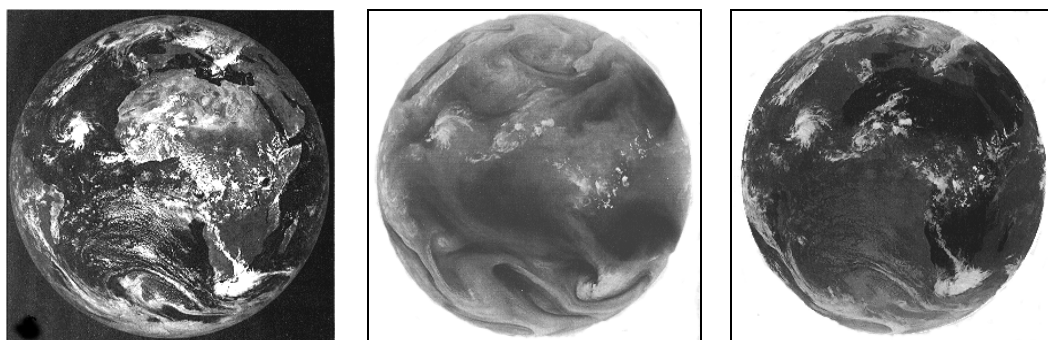
6.1.2 Obrazová data z METEOSATu

Základním snímacím zařízením METEOSATu je radiometr pracující ve třech pásmech, jejichž hlavní charakteristiky shrnuje tabulka 6.1

Tab. 6.1 Základní charakteristiky radiometru družice METEOSAT 5

číslo	označení pásma	interval vlnových délek	prostorová rozlišovací schopnost
1.	viditelné pásmo	0,5 - 0,9 μm	2,5 km
2.	pásmo vodních par	5,7 - 7,1 μm	5 km
3.	infračervené termální pásmo	10,5 - 12,5 μm	5 km

Uvedená prostorová rozlišovací schopnost platí pro subsatelitní bod a směrem k okrajům obrazového záznamu je výrazně degradována. Například v oblasti Evropy je v důsledku zakřivení Země velikost pixelu přibližně 7 x 9 km. Uvedený radiometr snímá přivrácenou stranu zemského disku každých 30 minut. Obrazový záznam je vytvořen rotací družice kolem své osy (spin - scan radiometr) během 25 minut, ve zbývajících pěti minutách se družice stabilizuje do výchozí pozice. Radiometr skenuje Zemi od východu na západ, vytvářený obrazový záznam má rozměr 5000 x 5000 obrazových prvků pro viditelné pásmo a 2500 x 2500 pixelů pro pásma zbývajících. Obr. 6.2. prezentuje příklady obrazových záznamů z jednotlivých pásem.



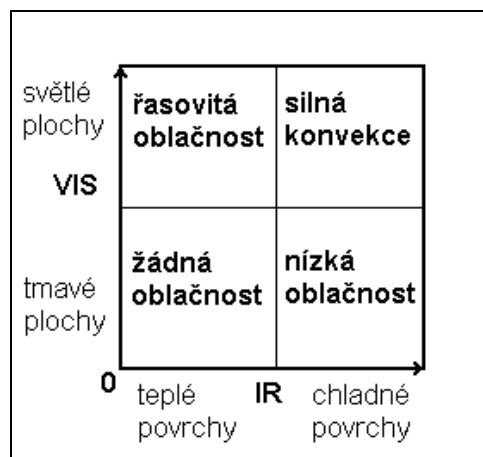
Obr. 6. Chyba! Neznámý argument přepínače. Obrazové záznamy pořízené družicí METEOSAT ve viditelném pásmu (a), pásmu vodních par (b) a infračerveném termálním pásmu (c).

Viditelné pásmo zaznamenává množství odraženého slunečního záření ze zemského povrchu. Obraz ve stupních šedi prezentuje oceány jako velmi tmavé plochy, povrch souše a nízká oblačnost jsou podány šedavými odstíny, vysoká oblačnost je na těchto obrazových záznamech bílá. Pozadí obrazu (vesmír) je znázorněn černou na rozdíl od pásem zbývajících, která měří množství emitovaného záření. Snímání ve viditelném pásmu je samozřejmě možné pouze v denních hodinách. V případě pásma vodních par je

radiometrem měřena radiace emitovaná vodními parami ve střední troposféře mezi hladinami 300 až 600 hPa. Tmavé plochy v obraze představují oblasti s vysokou radiační teplotou, a tudíž nízkou relativní vlhkostí. Naopak velmi světlé části obrazu představují oblasti s vysokou relativní vlhkostí. Světlé a tmavé plochy také indikují výstupné respektive sestupné pohyby v atmosféře. Infračervené termální pásmo měří dlouhovlnné vyzařování povrchů ve výrazném atmosférickém okně a koreluje s radiační teplotou povrchů. Oproti běžným zvyklostem zde tmavá místa zde představují teplé povrchy - především zemský povrch, oceány a nízkou oblačnost. Světlá místa představují velmi chladnou vysokou oblačnost.

6.1.3 Zpracování obrazových dat z METEOSATu

V důsledku kolísání polohy družice na její dráze i v důsledku geometrických nepřesností radiometru zahrnuje prvotní předzpracování obrazových záznamů z METEOSATu především geometrickou korekci obrazů metodou nejbližšího souseda. Obrazová data jsou kódována do osmi bitů (tj. do hodnot 0-255). Vlastní zpracování a generování meteorologické informace je potom z velké části automatizovaný proces umožňující operativně získávat jak kvalitativní, tak kvantitativní data a to nejen pro účely předpovědi počasí či meteorologie jako takové. Pro základní zpracování je obrazový záznam z METEOSATu rozdělen do tzv. segmentů o velikosti 32 x 32 pixelů infračerveného pásma (to je asi 160 x 160 km v subsatelitním bodě). Celý zemský disk pokrývá matice o velikosti 80 x 80 segmentů. Pro další, zvláště kvantitativní analýzu jsou prováděny atmosférické korekce, které využívají jak údajů o teplotě a vlhkosti z numerického předpovědního modelu ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecast), tak i jiných podpůrných dat z meteorologických pozemních měření.



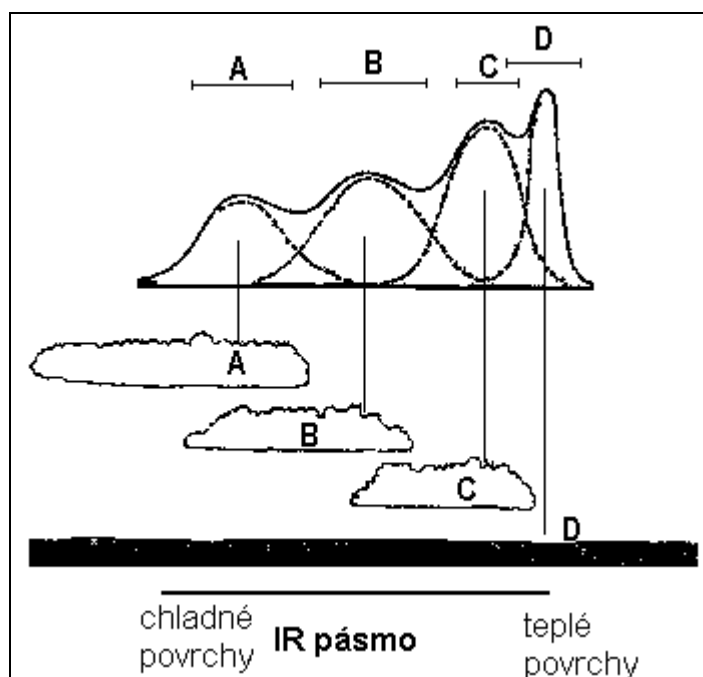
Obr. 6. Chyba! Neznámý argument přepínače. Vztah mezi základními vlastnostmi povrchů a DN hodnotami ve viditelném (VIS) a infračerveném (IR) pásmu. Upraveno podle KIDDER a VONDER HAAR (1995)

Vlastní objektivní analýza obrazových záznamů se skládá ze tří kroků:

1. Charakterizování jednotlivých segmentů na základě dat z podpůrných pozemních měření. Pro každý segment jsou předvídané možné radiační hodnoty z obrazu na základě hodnot vybraných fyzikálních i čistě meteorologických údajů. Obr. 6.3 schematicky znázorňuje vztah mezi DN hodnotami ve viditelném (VIS) a termálním infračerveném (IR) pásmu a základními charakteristikami povrchů.
2. Analýza histogramu jednotlivých pásem a korelační analýza mezi jednotlivými pásmy. V případě histogramu představují jeho jednotlivá lokální maxima určité typy

povrchů z hlediska jejich radiačních vlastností (např. druh oblačnosti), lokální minima v histogramu potom určují hranici mezi jednotlivými povrchy. Celý histogram potom představuje sérii gaussovských křivek - viz. obr. 6.4

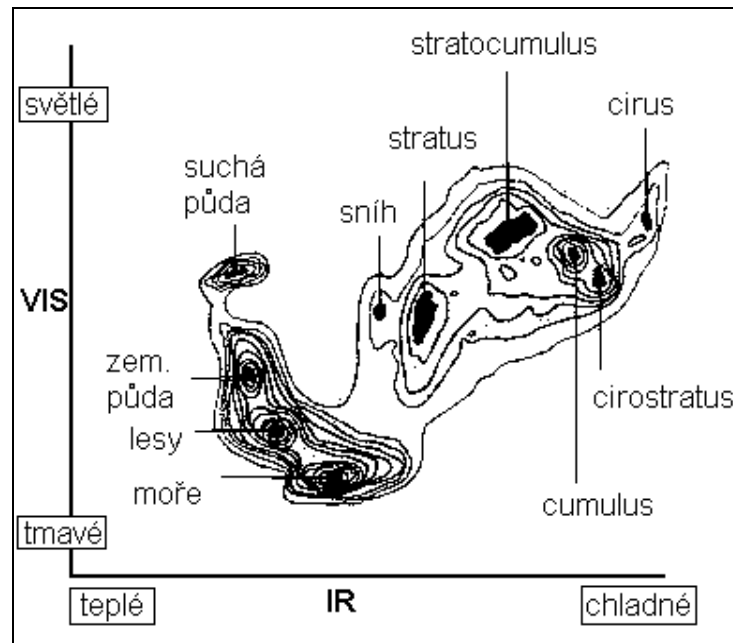
3. Porovnání částí obrazu, které byly určeny analýzou histogramu, s predikovanými hodnotami podle podpůrných dat a jejich interpretace jako základních druhů oblačnosti či různé povrchů souše či oceánu. V případě korelačního pole dvou zpracovávaných pásem obrazu mohou být v tomto poli zvýrazněny také četnosti výskytu kombinací odpovídajících si pixelů z obou pásem. Toto korelační pole si lze potom představit jako povrch, jehož „vrcholy“ v závislosti na poloze v korelačním poli představují opět určité typy povrchů (typů oblačnosti či povrchů moře a souše) - viz obr. 6.5.



Obr. 6. Chyba! Neznámý argument přepínače. Interpretace druhů povrchů na základě histogramu z infračerveného pásma (IR). A - vysoká oblačnost, B - oblačnost středního patra, C - nízká oblačnost, D - moře a souše. Úsečky v horní části obrázku indikují rozsah DN hodnot, které zabírají jednotlivé druhy povrchů.

Z jednotlivých pásem lze také vytvářet barevné syntézy. Často se pásma v RGB systému kombinují tak, že infračervené pásmo je prezentováno v odstínech červené a viditelné pásmo v odstínech zbývajících dvou základních barev. Na takovoto barevné syntéze je mohutná oblačnost znázorněna bílou barvou nebo světlými odstíny, teplé povrchy bez oblačnosti jsou téměř černé, nízká oblačnost se znázorňuje azurovou barvou, která vzniká složením zelené a modré. Řasy a vysoká oblačnost mívá červenou barvu.

Jinou velmi běžnou formou prezentace dat z geostacionárních družic je jejich animace, názorně ukazující pohyb oblačných systémů. Animace umožňuje kvantifikovat pohyb frontálních systémů a má velký význam pro krátkodobé předpovědi počasí a varovné systémy. Některé zpracovatelské systémy umožňují kombinovat obrazová data s daty získanými vertikální sondáží atmosféry. Také tento typ dat poskytuje řada družicových systémů. Integrace obou typů dat umožňuje prostorovou (3D) vizualizaci oblačnosti.



Obr. 6. Chyba! Neznámý argument přepínače. Interpretace druhů povrchů na základě korelačního pole DN hodnot viditelného (VIS) a infračerveného (IR) pásma

6.1.4 Produkty z obrazových dat METEOSATu

Po výše uvedené objektivní analýze obrazových dat jsou z nich generovány produkty pro další meteorologická i klimatologická zpracování. Většina těchto informací je ve formě map automaticky produkována i několikrát denně.

Pole větru - CMW (Cloud motion winds)

Pole větru je generováno na základě kvantifikace přemísťování oblačnosti zjištěné ze tří následujících IR obrazů. Výsledkem je tedy mapa průměrné rychlosti větru za posledních 60 minut. Analýza vychází z korelace mezi podobnými strukturami (oblačnými útvary) pro střední obraz a obrazy předcházející a následující. Produkt CMW je velmi důležitý především pro synoptické účely a je vytvářen čtyřikrát denně.

Teplota povrchu oceánu - SST (Sea Surface Temperature)

Výpočet SST vychází z předpokladu, že radiace emitovaná z povrchu na vlnové délce 11 μm je po atmosférické korekci úměrná teplotě daného povrchu. SST je počítána dvakrát denně.

Vlhkost v horní troposféře - UTH (Upper Tropospheric Humidity)

Tato charakteristika je odvozena z pásma vodních par a udává průměrnou vlhkost vrstvy 600 až 300 hPa. Je produkována pouze pro segmenty s nízkou oblačností obvykle dvakrát denně.

Index konvektivních srážek - PI (Precipitation Index)

Je počítán z IR pásma a jeho výpočet je založen na předpokladu, že čím chladnější je horní vrstva oblačnosti, tím intenzivnější jsou konvektivní procesy a tím větší je pravděpodobnost vypadávání srážek z této oblačnosti. Hodnota PI tedy představuje odhad sumy konvektivních srážek pro periodu pěti dní.

Analýza oblačnosti - CA (Cloud Analysis)

Z analýzy histogramu je sestavována 4 krát denně mapa množství oblačnosti a mapa teploty horní vrstvy oblačnosti a to až pro tři druhy oblačnosti v každém segmentu.

Výška horní hranice oblačnosti - CTH (Cloud Top Height)

Tento produkt je vytvářen z termálního infračerveného pásma a korigován daty z WV pásma. Pro blok o velikosti 4 x 4 pixely uvádí výšku horní hranice oblačnosti a to s krokem 1500 metrů ve vrstvě 3 až 12 kilometrů. Informace o CTH je poskytována čtyřikrát denně.

Podpurná data - CDS (Climate Data Set)

Uvedený produkt shrnuje hlavní výsledky objektivní analýzy histogramu, uvádí hodnoty korekcí infračerveného pásma a podobně. Je generován osmkrát denně.

Z dalších produktů lze jmenovat například **výpočet albeda** z viditelného pásma podle následujícího vztahu:

$$A = \frac{0,0041 \cdot VIS}{\cos(i)}$$

kde A - albedo
VIS - hodnota pixelu ve viditelném pásmu
i - zenitový úhel Slunce

Za pomoci kalibračních konstant lze z termálního infračerveného pásma vypočítat hodnoty **radiační teploty** a z ní určit teplotu povrchů:

$$R = (IR - IRSPC) \cdot IRCAL$$

kde R - radiační teplota povrchu
IR - hodnota pixelu v IR pásmu
IRSPC, IRCAL - kalibrační konstanty

Kalibrační konstanty lze získat například prostřednictvím sítě Internet. Před vlastním rozesláním uvedených produktů koncovým uživatelům jsou tyto podrobeny kontrole za pomoci synoptických dat s využitím základních postupů digitálního zpracování obrazu.

6.1.5 Příjem dat z družic METEOSAT

Originální obrazová data z radiometru jsou vysílána na frekvenci 1863 MHz na pozemní stanici v Darmstadtu. Po dekódování a radiometrickém a geometrickém předzpracování a kompenzaci atmosférických vlivů je ke každému snímku připojena radiometrická kalibrační informace umožňující kvantitativní výpočty - např. výpočet radiační teploty. Po vlastním zpracování jsou výsledné produkty vysílány zpět na družici a odtud k uživateli. Příjemci stanice uživatele jsou označovány jako PDUS a SDUS.

Stanice primární - PDUS (Primary Data User Station) mohou přijímat data v plném rozlišení HRI v digitální podobě s radiometrickým rozlišením osmi bitů. Těchto dat lze plně využít ke kalibracím a výpočtům výše uvedených produktů. **Stanice sekundární - SDUS** (Secondary Data User Station) přijímají informace v analogovém formátu WEFAX. Tento formát do jisté míry degraduje kvalitu původních dat, což má za důsledek omezené možnosti přesné kalibrace obrazových dat. Data z primárních stanic lze získat pouze za určitý poplatek stanovený pro každou zemi organizací EUMETSAT, data sekundární (SDUS) však lze získat zdarma a například v síti Internet je možné najít aktuální snímky na řadě serverů.

6.1.6 Další možnosti využití dat z družic METEOSAT

Jak je zřejmé ze zaměření celého systému, hlavní využití nalézají obrazová data z METEOSATu v oblasti meteorologie a klimatologie. V těchto disciplínách nacházejí uplatnění především při předpovědi počasí, měření pole větru v různých hladinách, určování teploty povrchu oceánu, měření obsahu vodní páry v troposféře či odhadu množství konvektivních srážek. Dále sem patří zjišťování parametrů oblačnosti, jako je druh oblačnosti, její množství a rozložení, výška horní hranice oblačnosti a podobně. V oblasti klimatologie lze snímky využít ke studiu prvků všeobecné cirkulace atmosféry, ke studiu složek radiační bilance a podobně.

Vedle těchto „klasických“ oblastí jsou informace z družic METEOSAT využívány také například v oblasti zemědělství a lesnictví, v oblasti vodního hospodářství, rybolovu, v oblasti systémů varujících před přírodními katastrofami jako jsou tropické cyklóny, následné povodně atd.

Nové družice systému METEOSAT, připravované pod označením METEOSAT SG k vypuštění po roce 2000, by měly poskytovat kvalitativně nová data, která budou získávána s novým typem radiometru pracujícím v osmi pásmech spektra. Tento by měl poskytovat obrazové záznamy s vyšším prostorovým rozlišením (1 km ve viditelném oboru spektra a 3 km v ostatních pásmech). Měla by být také zvýšena frekvence skenování a obrazové záznamy budou generovány každých 15 minut. Vyšší kvalitu by měl představovat také systém přenosu dat mezi družicí a pozemními stanicemi, který má být plně digitalizován.

Další informace o systému geostacionárních družic lze nalézt na následujících adresách:

<http://libus.chmi.cz>

<http://www.liv.ac.uk>

<http://typhoon.rdg.ac.uk>

<http://www.sat.dundee.ac.uk>

<http://www.mmm.ucar.edu/pm/satellite>

http://www.pmel.noaa.gov/data_rescue/satellite

6.2 NOAA

6.2.1 Základní charakteristika družic systému NOAA

Systém družic NOAA je jedním z nejvýznamnějších zástupců rozsáhlé skupiny meteorologických družic pohybujících se na polárních drahách. Data z družic NOAA však nacházejí uplatnění i v řadě jiných aplikací, než pouze v meteorologii a klimatologii. Je to především oblast mapování vegetace.



Obr. 6. Chyba! Neznámý argument přepínače. Družice NOAA-11

Řada družic NOAA navazuje na družice TIROS. Do současnosti bylo vypuštěno na oběžnou dráhu 14 družic NOAA. Jednotlivé družice jsou původně označovány písmeny, po uvedení na oběžnou dráhu je písmeno nahrazeno pořadovým číslem. V současné době jsou v provozu družice označené čísly 9, 10, 12 a 14 (původně NOAA-J).

Družice se pohybují po subpolární dráze ve výšce 833 km nad zemským povrchem. Doba oběhu činí asi 102 minut, družice vykoná 14 oběhů za den. V detailech se parametry orbity pro konkrétní družice poněkud liší. Poslední družice NOAA 14 přechází rovník od severu k jihu v 7 hod. 30 min. a je schopna snímat celou zemskou kuli, tedy včetně polárních oblastí.

Základním zobrazujícím zařízením na palubě družic NOAA je multispektrální radiometr **AVHRR** (Advanced Very High Resolution Radiometr). Jde o mechanooptický skener snímající při jednom přeletu území o šířce 2400 km. Radiometr pracuje v pěti spektrálních pásmech, jejichž základní charakteristiky shrnuje tabulka 6.2. Široký rozsah záběru radiometru při jednom přeletu dovoluje snímat stejné území dvakrát v průběhu 24 hodin - při denním a nočním přeletu. Při nočním přeletu je snímáno pouze v termálních pásmech.

Tab. 6.2. Základní charakteristiky pásem radiometru AVHRR

číslo pásma	interval vlnových délek [μm]	slovní označení pásma	prostorová rozlišovací schopnost [km]
1.	0,55 - 0,68	viditelné	1,1
2.	0,725 - 1,10	blízké infračervené	1,1
3.	3,55 - 3,92	termální	1,1
4.	10,50 - 11,50	termální	1,1
5.	11,00 - 12,50	termální	1,1

6.2.2 Zpracování obrazových dat z družic NOAA

Obrazová data z AVHRR mohou být získávána ve 4 základních formátech. V reálném čase lze na pozemních stanicích přijímat data ve formátu APT (Automatic Picture Transmission) s prostorovým rozlišením přibližně 4 km a data ve formátu HRPT (High Resolution Picture Transmission) s plným prostorovým rozlišením 1,1 km. S tímto vysokým rozlišením jsou dále data zaznamenávána na palubě družice ve formátu LAC (Local Area Coverage). Úpravou těchto původních dat do rozlišení zhruba 4 km (zaznamenáním každého 3 pixelu) je vytvářen formát GAC (Global Area Coverage). Data ve formátech LAC a GAC jsou získávána při přeletu družice nad přijímací stanicí. Obrazová data jsou poměrně přesně geometricky korigována na základě parametrů dráhy nosiče, což umožňuje jejich kombinaci s vektorovými daty pro mapování v malých měřítcích. Je možné jejich propojení například s daty Digital Chart of the World (DCW).

6.2.3 Možnosti využití obrazových dat družic NOAA

Jak je zřejmé z výše uvedené tabulky, obrazová data z radiometru AVHRR lze využít jak pro environmentální, tak i pro čistě meteorologické aplikace. Pásma ve viditelné a infračervené části spektra (první a druhé) slouží k identifikaci a klasifikaci oblačnosti. Používá se jich však také pro výpočet jednoduchého či normalizovaného (NDVI) vegetačního indexu, a tedy k odhadu množství zelené hmoty, k výpočtu indexu listové pokrývnosti (LAI), k odhadu tzv. fotosynteticky aktivní radiace (PAR) či odhadu spotřeby CO₂.

Obrazová data mapující hodnoty NDVI jsou vytvářena nejčastěji jako mozaiky několika snímků ve smyslu prostorovém i časovém. Pro odfiltrování oblačnosti se mapa NDVI sestavuje z několika obrazových záznamů stejného území pořízených obvykle za posledních 10 dní a DN hodnota pro každý obrazový prvek mapy NDVI je brána jako maximum ze všech uvažovaných obrazových záznamů. Tímto je vytvořena „průměrná“ mapa NDVI, ze které je odfiltrována oblačnost. Algoritmus je založen na předpokladu, že v průběhu 10 dní se na ploše každého obrazového prvku záznamu nevyskytovala alespoň v jednom případě oblačnost.

Data lze dále využívat k monitorování vývoje kulturních rostlin, průběhu fenologických fází či odhadu výnosu některých zemědělských plodin. Na obrazových záznamech lze dále dobře monitorovat procesy mýcení tropických lesů a procesy desertifikace. Pásmo 3 až 5 zabírají obě významná atmosférická okna v termální části elektromagnetického spektra. Obrazových záznamů z těchto pásem se využívá například ke zjišťování teploty horní vrstvy oblačnosti a teploty povrchu oceánu, ale také k řadě environmentálních studií jako je mapování vulkánů a jejich aktivity, k detekci a lokalizaci lesních požárů, ke zjišťování znečištění (např. ropných skvrn), k mapování vývoje sněhové pokrývky, ke zjišťování prvků radiační či vodní bilance, k odhadu půdní vlhkosti, k monitorování procesů tání sněhu a ledu, monitorování mraků pocházejících z vulkanické činnosti, výzkumu energetické bilance Země atd.

Kromě zobrazujícího radiometru AVHRR nesou družice NOAA také několik zařízení sloužících k vertikální sondáži atmosféry označované zkratkou **TOVS** (TIROS Operational Vertical Sounder). Tato zařízení pracují s malým prostorovým rozlišením a poskytují data o vertikálním teplotním profilu atmosférou, o obsahu vodní páry na různých hladinách či o celkové koncentraci ozónu.

Data z družic NOAA v současné době tvoří základní pilíř projektů studujících globální změny. K těmto projektům patří například MPE (Mission to Planet Earth), EOS (Earth Observation System), IGBP (International Geosphere-Biosphere Program). Z globálních databází dosažitelných na Internetu lze jmenovat například Satellite Active Archive (<http://www.saa.noaa.gov>), Global 1km AVHRR Server (<http://atlas.esrin.esa.it:8000>) nebo GLIS (Global Land Information System (<http://edcwww.cr.usgs.gov/glis/glis.html>)). V uvedených archívech lze získat mapy druh; povrchů (landcover), mapy hodnot NDVI, mapy řady meteorologických prvků (SST) atd.

6.2.4 Budoucnost družic systému NOAA

Další družicí systému NOAA by měla být družice NOAA - K, která bude po uvedení na oběžnou dráhu plánovaném na rok 1998 nést označení NOAA 15. Družice by měla být vybavena vylepšeným radiometrem AVHRR/3, který by měl oproti stávajícímu radiometru snímat v novém pásmu v intervalu vlnových délek 1,56 - 1,64 μm . Toto pásmo by mělo poskytovat při denním přeletu kvalitnější obrazová data oproti stávajícímu třetímu termálnímu pásmu. Další vylepšení se budou týkat přístrojů pro vertikální sondáž atmosféry. Další informace o družicích NOAA lze získat například na následujících adresách:

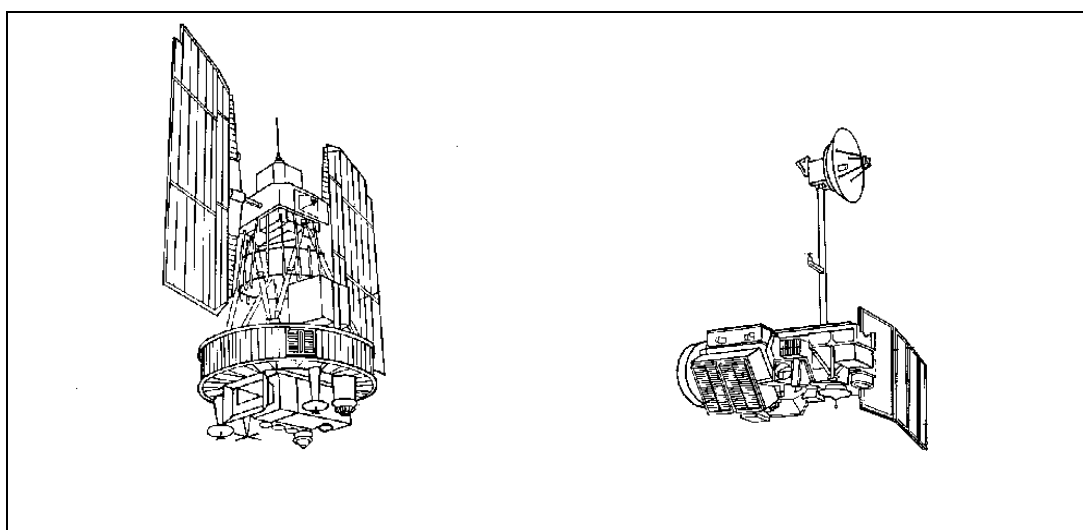
<http://www2.ncdc.noaa.gov>

<http://www.noaa.gov>

<http://www.sat.dundee.ac.uk>

6.3 LANDSAT

Družice systému LANDSAT a obrazová data, která jsou tímto systémem produkována, představují již od počátku 70. let nejvýznamnější zdroj informací o přírodních zdrojích Země. První družice tohoto systému byla uvedena na oběžnou dráhu v roce 1972 pod označením ERTS 1 a později byla přejmenována na družici LANDSAT 1. Od té doby bylo vypuštěno dalších 5 družic LANDSAT. Všechny družice byly uvedeny na subpolární oběžnou dráhu blízkou kruhové dráze, družice na své orbitě zachovávají vždy stále stejnou polohu vzhledem ke Slunci. Parametry oběžných drah prvních tří družic se poněkud odlišovaly od družic LANDSAT 4 a 5. Družice LANDSAT 6 skončila po neúspěšném startu ve vlnách Pacifiku a nebyla funkční. V současné době poskytuje obrazová data pouze družice LANDSAT 5. První generace družic LANDSAT 1-3 se odlišovala vedle parametrů orbity také základním vybavením pro snímání zemského povrchu.



Obr. 6. Chyba! Neznámý argument přepínače. Družice LANDSAT 1-3 (a) a LANDSAT 4-5 (b)

Družice LANDSAT 5 obíhá po dráze v průměrné výšce 705 km s dobou oběhu 99 minut, inklinace dráhy družice je 98,2 stupňů a po 16 dnech, při nichž družice vykoná 233 oběhů kolem Země, se dostává na stejné místo nad zemským povrchem. Družice přechází rovník v 9.42 místního času a poskytuje obrazová data území mezi 81 stupňů s.z.š. a 81 stupňů j.z.š.

6.3.1 Přístroje na družici LANDSAT 5

První tři družice LANDSAT byly vybaveny televizním systémem RBV a multispektrálním skenerem MSS. Skener MSS je i na družici LANDSAT 5 a poskytuje tak časovou řadu obrazových záznamů zemského povrchu dlouhou 25 let. Hlavním zobrazujícím zařízením na LANDSAT 5 multispektrální skener označovaný jako TM (Thematic Mapper).

MSS

Multispektrální skener MSS je mechanooptický skener pracující ve 4 spektrálních pásmech, jejichž základní charakteristiku shrnuje tabulka 6.3. Zařízení snímá území o šířce 185 kilometrů s radiometrickým rozlišením 6 bitů (0-64). Velikost scény je přibližně 3240 x 2340 obrazových prvků.

Tab. 6.3 Základní charakteristiky skeneru MSS

číslo pásma	interval vlnových délek [μm]	označení pásma	velikost pixelu [m]
1.	0,5 - 0,6	zelené	80
2.	0,6 - 0,7	červené	80
3.	0,7 - 0,8	blízké infračervené	80
4.	0,8 - 1,1	blízké infračervené	80

První pásmo (zelené) je vhodné především pro studium vodních objektů, protože do jisté míry také proniká vodním sloupcem, tak i pro studium tvarů dna a dále například pro monitorování rozsahu sněhové pokrývky. Druhé pásmo MSS je použitelné ke studiu vodních objektů, komunikací, půd, vegetace. Blízká infračervená pásma jsou méně ovlivňována atmosférou, slouží k dobrému odlišení vodních ploch a k vegetačním a geologickým aplikacím.

Thematic Mapper

TM je mechanooptický multispektrální sener snímající zemský povrch kolmo ke dráze pohybu nosiče v pruhu širokém přibližně 185 kilometrů. Skener pracuje v sedmi oblastech spektra - pásmech - s radiometrickým rozlišením osmi bitů. Základní charakteristiky těchto pásem pro TM družice LANDSAT 5 shrnuje tabulka 6.4.

Tab. 6.4 Základní charakteristiky skeneru Thematic Mapper (LANDSAT 5)

číslo pásma	interval vlnových délek [μm]	slovní označení	velikost pixelu [m]
1.	0,45 - 0,52	modré	30
2.	0,52 - 0,60	zelené	30
3.	0,63 - 0,69	červené	30
4.	0,76 - 0,90	blízké infračervené	30
5.	1,55 - 1,75	stř. infračervené	30
6.	10,4 - 12,5	termální	120
7.	2,08 - 2,35	stř. infračervené	30

Pásmo TM-1 se vyznačuje poměrně malým kontrastem. Protože zaznamenává nejkratší vlnové délky obrazové záznamy jsou značně ovlivňovány poměrně značným rozptylem v atmosféře. Obrazové záznamy z tohoto pásma se využívají například k pobřežnímu mapování, k odlišení ploch pokrytých vegetací či holou půdou a také pro identifikaci antropogenních tvarů, především zastavěných ploch a ploch ovlivněných těžbou.

Pásmo TM-2 je rovněž ovlivněno rozptylem záření a atmosférickým zákalem. Protože je ve viditelné části spektra umístěno v intervalu maximální odrazivosti vegetace, slouží k mapování jejího výskytu.

Pásmo TM-3 slouží k určování průběhu komunikací, k mapování ploch bez vegetace a všech antropogenních povrchů. Tento interval spektra je výrazně ovlivňován pohlcováním záření chlorofylem, a proto slouží také ve spojení s blízkým infračerveným pásmem k odlišování druhů vegetace či k určování množství zelené hmoty.

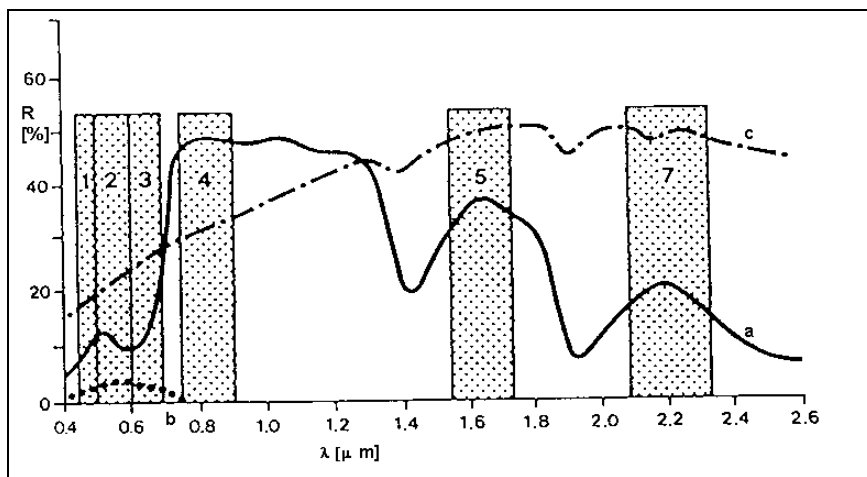
Pásmo TM-4 je využíváno především ve vegetačním studiím, k výpočtu spektrálních (vegetačních) indexů, dále k identifikaci vodních ploch a mapování půdní vlhkosti. Na druhé straně na obrazových záznamech tohoto pásma zanikají komunikace a umělé povrchy.

Pásmo TM-5 je využíváno k vegetačním studiím a k mapování půdní vlhkosti. Poskytuje poměrně kontrastní obraz jak pro plochy pokryté různými druhy vegetace, tak pro plochy holé půdy. V tomto pásmu lze také dobře odlišit plochy pokryté sněhovou pokrývkou od oblačnosti. Vzhledem k delším vlnovým délkám již obraz není tolik degradován zákalem v atmosféře.

Pásmo TM-6 zaznamenává termální radiaci z povrchů. Ta do jisté míry koreluje z řadou dalších charakteristik stavu povrchů, jako jsou například půdní vlhkost nebo teplotní poměry vegetačního krytu. Z obrazových záznamů tohoto intervalu spektra lze zjišťovat teplotní stres rostlin či vláhový deficit. V zastavěných plochách lze zjišťovat teplotní znečištění či prvky teplotní bilance. V důsledku problémů s kalibrací naměřených hodnot se obrazových záznamů využívá pouze pro kvalitativní hodnocení výše uvedených jevů.

Pásmo TM-7 bylo do systému dodáno na základě speciálních požadavků geologických aplikací. V této části spektra se řada minerálů a hornin vyznačuje charakteristickými zářivými vlastnostmi, kterých lze využít k jejich rozpoznávání. Na těchto obrazových záznamech lze dobře studovat také vlastnosti půdního pokryvu, rozlišení vegetačního krytu je poněkud obtížnější ve srovnání s pásmem TM-5.

Základní představu o umístění jednotlivých pásem TM ve vztahu ke spektrálnímu chování základních povrchů, si lze učinit z obr. 6.8.



Obr. 6. Chyba! Neznámý argument přepínače. Spektrální rozlišení jednotlivých pásem TM a průměrné křivky spektrálního chování pro vegetaci (a), vodu (b) a holou půdu (c)

6.3.2 Možnosti využití obrazových dat LANDSAT

Tab. 6.5 Vhodnost jednotlivých pásem skeneru TM pro identifikaci vybraných tříd povrchů. Vysvětlivky: 1 - vhodné, 2 - středně vhodné, 3 - málo vhodné, 4 - nevhodné. Převzato z práce TRAVAGLII (1990).

Třída povrchu	TM-1	TM-2	TM-3	TM-4	TM-5	TM-7
Identifikace vodních objektů	3	3	2	1	1	1
Vlastnosti vodních objektů	1	1	3	4	4	4
Uspořádání sítě vodních toků	3	3	2	1	1	2
Půdní druhy	3	2	1	2	1	2
Lesní plochy	2	2	2	1	1	2
Zemědělská půda	3	2	2	1	1	2/1
Zastavěné plochy	2/1	1	1	3	3	3/2
Oblasti těžby nerostů	3	3	3	1	2	2

Vzhledem k prostorové rozlišovací schopnosti lze obrazových dat z TM použít k tématickému mapování do měřítek 1 : 50 000 až 1 : 25 000. Protože družice LANDSAT jako první poskytovaly z hlediska prostorového i spektrálního rozlišení poměrně kvalitní komerčně využitelný obrazový materiál, aplikace, ve kterých byla data z MSS a TM použita, zahrnují téměř všechny oblasti aktivit spojených s tématickým mapováním zemského povrchu v uvedených měřících. V současné době archiv obrazových záznamů z MSS čítá na 650 000, TM potom více jak 300 000 položek. V tabulkách 6.5 a 6.6 je v přehledu uvedena vhodnost jednotlivých pásem TM i vybraných barevných syntéz pro identifikaci vybraných jevů či povrchů. Je však nutno poznamenat, že v případě konkrétní scény z konkrétního území nemusí uvedené stupnice platit

Tab. 6.6 Vhodnost vybraných barevných syntéz z pásem TM v systému RGB pro identifikaci vybraných jevů. Čísla pásem TM v jednotlivých syntézách jsou uváděna v pořadí základních barev červená - zelená - modrá; vyšší číslo znamená menší vhodnost dané kombinace pásem. Převzato z práce TRAVAGLII (1990).

Identifikovaný jev	TM-432	TM-321	TM-532	TM-543	TM-453	TM-345	TM-743
Zastavěné oblasti	1-2	6	5	2-4	1	1-2	3
Obsah sedimentů ve vodě	2	1	3	5-6	5-6	4	5-6
Síť vodních toků	1	6	2	3-5	2	4	3
Hranice zemědělské půdy	2	6	4	3	3	5	1
Hranice vody a vegetace	2	6	5	1-3	1	4	3
Půdní poměry	1	5	6	2-3	2	2-3	4
Druhy vegetace	2	6	5	1	1	4	3
Menší vodní plochy	4	6	5	3	3	2	1

6.3.3 Budoucnost družic systému LANDSAT

Pokrok v programu družic LANDSAT byl nepříznivě poznamenán neúspěšným startem družice LANDSAT 6 v roce 1993, která měla být multispektrálním skenerem s označením ETM (Enhanced TM), který ve srovnání s TM měl snímat zemský povrch také v panchromatickém pásmu v intervalu 0,5 až 0,9 mikrometrů s prostorovým rozlišením 15 metrů.

V současné době je připravováno vypuštění družice LANDSAT 7. Základními snímacími zařízeními má být především ETM+ s obdobnými charakteristikami jako ETM - tedy s panchromatickým pásmem, s vyšším prostorovým rozlišením termálního pásma a s dokonalejší radiometrickou kalibrací.

Další snímací zařízení na LANDSAT 7 má nést označení HRMSI a mělo by jít optoelektronický multispektrální skener poskytující jednak panchromatická data s prostorovým rozlišením 5 metrů, jednak 4 pásma v multispektrálním módu s rozlišením 10 metrů. Stejně jako v případě družic SPOT má mít uvedený skener možnost snímat území i mimo čáru nadiru a vytvářet tak stereoskopické dvojice obrazových záznamů. Vyšší geometrickou přesnost obrazových dat z LANDSAT 7 má zajišťovat použití GPS.

Další informace o družicích LANDSAT lze získat například na následujících adresách:

<http://edcwww.cr.usgs.gov/glis/hyper/guide/landsat>

<http://fdd.gsfc.nasa.gov/missions/landsat7.html>

http://www.eurimage.it/Products/LS/Msample_images.html

<http://www.nrct.go.th/htmlpages/userservice/landsat.html>

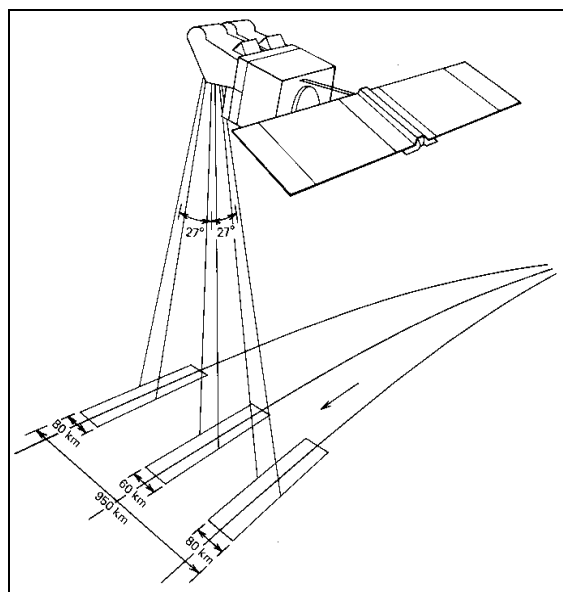
<http://ceps.nasm.edu:2020/RPIF/LANDSAT/Viewing.html>

<http://geo.arc.nasa.gov/sge/landsat/landsat.html>

6.4 Systém družic SPOT

Systém SPOT tvoří série francouzských družic pro výzkum přírodních zdrojů Země. Tyto družice vedle družic systému LANDSAT představovaly v posledním desetiletí základní zdroj obrazových dat získávaných distančními metodami pro nejrůznější environmentální účely od topografického mapování po vegetační studie apod.

Celý systém je spravován francouzskou kosmickou agenturou (CNES), data na komerční bázi distribuuje soukromá společnost SPOT IMAGE. První družice celého systému SPOT 1 byla vypuštěna na oběžnou dráhu v roce 1986. V letech 1990 a 1993 následovaly družice SPOT 2 a 3, na rok 1997 je plánováno vypuštění družice SPOT 4 a družice SPOT 5 by měla být uvedena na oběžnou dráhu v roce 2001. Družice SPOT se pohybují na subpolární, se sluncem synchronní oběžné dráze v průměrné výšce 822 km nad zemským povrchem. Dalšími parametry dráhy družice je inklinace (98°) a průměrná doba oběhu, která činí 101,4 minut. Družice snímá stejné místo na Zeměkouli vždy po 26 dnech, během nichž vykoná 369 oběhů. Rovník překračuje v 10 hod 30 min. místního času vždy ve vzdálenosti 2823 km od předchozího přeletu rovníku. Celý systém



poskytuje obrazové záznamy z intervalu 87 stupňů j.z.š. až 87 stupňů s.z.š.

Obr. 6. Chyba! Neznámý argument přepínače. Družice SPOT a její možnost snímání po stranách letu

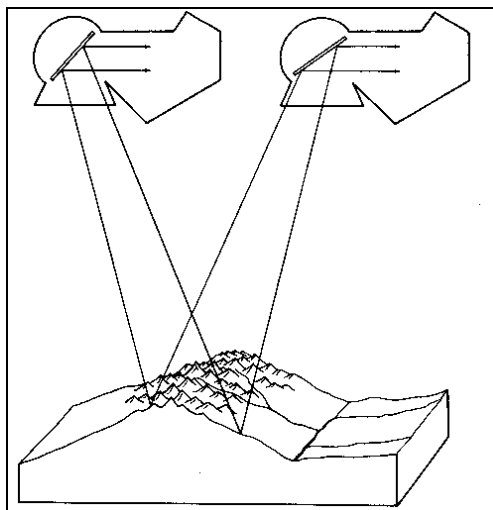
6.4.1 Charakter obrazových dat z družic SPOT

Základními přístroji pro vytváření obrazových záznamů zemského povrchu jsou dva multispektrální radiometry označované zkratkou **HRV** (High Resolution Visible). Tyto optoelektronické radiometry vytvářejí obraz zemského povrchu tzv. podélným skenováním na rozdíl od základních přístrojů umístěných na družicích LANDSAT, které vytváří obrazové záznamy příčným skenováním. Každý z radiometrů snímá území o šířce 60 km stranou subsatelitní křivky. V běžném snímacím režimu se záznamy z obou

radiometrů překrývají asi o 3 km. Jedna řádka obrazového záznamu obsahuje v závislosti na režimu snímání 6000 resp. 3000 pixelů.

Z hlediska spektrálního rozlišení mohou přístroje pracovat ve dvou základních režimech. V **panchromatickém režimu (PAN)** radiometr snímá zemský povrch v jednom širokém intervalu spektra omezeném vlnovými délkami 0,51 až 0,75 μm . Panchromatické obrazové záznamy jsou charakterizovány vysokým prostorovým rozlišením, velikost pixelu je 10 x 10 metrů. V **režimu multispektrálním (XS)** snímá radiometr zemský povrch ve třech pásmech - zeleném (0,50-0,59 μm), červeném (0,61-0,68 μm) a blízkém infračerveném (0,79-0,89 μm). Multispektrální obrazové záznamy mají prostorovou rozlišovací schopnost 20 metrů a jsou kódována do 256 úrovní.

Systém HRV snímá zemský povrch nejen kolmo pod družicí, ale umožňuje nastavovat radiometry v rozsahu plus minus 27 stupňů (viz obr. 6.9). Tato schopnost umožňuje výrazně zvýšit četnost snímání, která může ve střední Evropě dosahovat 4 dnů. Dalším využitím uvedeného natáčení radiometrů je vytváření stereoskopických dvojic obrazových záznamů. Díky nastavitelnému úhlu snímání radiometru lze totéž místo snímat při následných přeletech družice a z takovýchto obrazových záznamů lze při poměrně dobré prostorové rozlišovací schopnosti sestavovat za pomoci postupů digitální fotogrammetrie digitální model terénu.



Obr. 6. Chyba! Neznámý argument přepínače.
Princip vytváření digitálního modelu terénu z dvojic obrazových záznamů družice SPOT

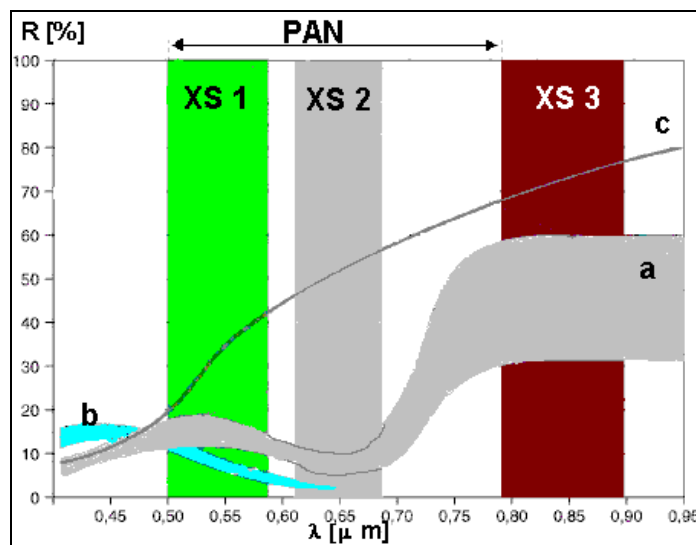
6.4.2 Možnosti využití obrazových dat družic SPOT

Nasnímaná obrazová data mohou být archivována na palubě družice a vysílána při nočních přeletech. Tato archivní data jsou přijímána na stanicích Toulouse (Francie) a Kiruna (Švédsko). Data však mohou být také vysílána v reálném čase přímo k zemskému povrchu a zaznamenávána pomocí celosvětové sítě 16 přijímacích stanic.

Obrazové záznamy mohou být na stanicích předzpracovány v pěti základních úrovních. Tato předzpracování zahrnují především radiometrické a geometrické korekce až po tvorbu družicových ortofotomap a generování digitálního modelu terénu. K uživateli mohou být dodávána jak v analogové, tak v digitální podobě. Na nejvyšší úrovni

předzpracování je možné obdržet produkt označovaný jako SPOTView, umožňující okamžitou integraci obrazových dat do GIS.

Z charakteristiky obrazových dat PAN i XS jsou zřejmé i možnosti jejich využití. Obrazová data z panchromatického pásma (PAN) jsou vizualizována v odstínech šedi a při prostorové rozlišovací schopnosti 10 metrů dovolují sestavovat topografické mapy a družicové ortofotomapy až do měřítka 1 : 10 000. Multispektrální data i vzhledem k omezenému spektrálnímu rozlišení (ve srovnání například s LANDSAT TM) poskytují hodnotné informace pro mapování základních druhů pokrývnosti (obr. 6.11). Obraz vytvořený v zelené části viditelného spektra se vyznačuje malým kontrastem a je degradován zákalem atmosféry, proto se ho používá především v barevných syntézách. Obraz v červené části spektra velmi dobře registruje především holou půdu bez vegetace a také komunikační systém (cesty). Pásmo také vykazuje poměrně dobrý kontrast mezi plochami bez vegetace a plochami pokrytými vegetací. Obraz vytvořený v blízké infračervené části spektra především velmi dobře separuje vodní plochy od ostatních povrchů a slouží společně s předchozím pásmem k určování množství biomasy například prostřednictvím vegetačních indexů (VI, NDVI). Multispektrální pásma jsou často vizualizována v nepravě barevné syntéze, na níž jsou plochy pokryté vegetací podány odstíny červené barvy. Data XS jsou tedy vhodná také pro tématiké mapování druhů povrchů (landcover), mapování využití země (landuse) či pro studium časových změn v území. Digitální model terénu vytvořený ze stereo snímků SPOT s přesností kolem 5 metrů dává možnosti generování základních morfometrických charakteristik reliéfu. Dalšími oblastmi aplikací jsou zemědělství a lesnictví, studium rozvoje příměstských oblastí, ochrana přírody apod.



Obr. 6. Chyba! Neznámý argument přepínače. Spektrální rozlišení XS a PAN pásem SPOT a průměrné křivky spektrálního chování pro vegetaci (a), vodu (b) a holou půdu (c)

6.4.3 Budoucnost družic systému SPOT

Nové družice SPOT 4 budou obsahovat významná vylepšení systému. Multispektrální režim bude doplněn o pásmo ve středních infračervených vlnových délkách (1,58 - 1,57 μm), což zvýší možnosti tématikého mapování a automatické klasifikace obrazu v řadě aplikací, především ve vegetačních studiích či geologických studiích. Družice bude dále mimo jiné nově vybavena speciálním radiometrem určeným ke studiu vegetace

(Vegetation Instrument). Toto zařízení má poskytovat přehledové snímky z plochy široké 2000 km s prostorovým rozlišením 1 km. Bude pracovat v multispektrálním módu ve viditelné, blízké a střední infračervené části spektra.

Družice SPOT 5 ponesou nový přístroj s označením HRG (High Resolution Geometry). Hlavní progres tohoto multispektrálního skeneru bude představován zhruba dvakrát lepší prostorovou rozlišovací schopností oproti současným systémům HRV, a to v režimu PAN (5 metrů) i XS (10 metrů). Geometrie těchto zařízení by měla umožňovat snímat území před a za družicí pro tvorbu stereoskopických dvojic obrazů, což by oproti současnému systému mělo zvýšit přesnost dat pro tvorbu DTM a ortorektifikaci obrazu. Další informace o družicích SPOT lze získat například na následujících adresách:

<http://www.spot.com>

<http://www.spotimage.fr>

<http://www.crisp.nus.sg/spot/spot.html>

<http://www.spotimage.com.au>

http://heron.met.nps.navy.mil/bob/sat/land_sat.html

6.5 IRS (Indian Remote Sensing Satellites)

Indie vyvíjí již delší dobu značnou aktivitu na poli environmentálního DPZ. V letech 1988, 1991a 1995 postupně vypustila na oběžnou dráhu tři družice systému označené IRS-1A, IRS-1B resp. IRS-1C. Obrazová data z těchto družic mají velký význam hned ze dvou důvodů. Vzhledem ke snímaným pásmům elektromagnetického záření mají obrazové záznamy vzhled podobný datům z družic LANDSAT TM. Za druhé data poskytovaná družicí IRS-1C se vyznačují značným prostorovým detailem. V panchromatickém režimu jsou družic poskytována data s prostorovým rozlišením 5,8 metrů, což je v současné době nejlepší rozlišení ze všech komerčně využívaných družic. Vedle zmíněného systému družic byly Indií vypuštěny také družice s označením IRS-P2 (1994) a IRS-P3 (1996). Vesměs jde o družice pohybující se na subpolárních drahách ve výšce přibližně 800 km.

6.5.1 Charakter obrazových dat z družic IRS

Tab. 6.7 Vybrané parametry družic IRS (podle materiálů fy EUROMAP)

DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ

Družice	datum uvedení na oběžnou dráhu	zařízení	spektrální pásma [μm]	prostorové rozlišení [m]	šířka záběru [km]	časové rozlišení [dny]
IRS-1B	29.8.91	LISS-1	0,45-0,52	72,5	148	22
			0,52-0,59			
			0,62-0,68			
			0,77-0,86			
		LISS-2	0,45-0,52	36,35	74	22
			0,52-0,59			
IRS-P2	16.10.94	LISS-II	0,45-0,52	32 x 37	74	24
			0,52-0,59			
			0,62-0,68			
			0,77-0,86			
IRS-P3	15.2.96	WiFS	0,62-0,68	188	804	5
			0,77-0,86			
			1,55-1,70			
IRS-1C	28.12.95	LISS-III	0,52-0,59	23	142	24
			0,62-0,68			
			0,77-0,86			
			1,53-1,70			
		WiFS	0,62-0,68	188	804	5
			0,77-0,86			
		Pan	0,50-0,75	5,8	70	24 (5) ¹

Družice IRS jsou většinou vybaveny několika multispektrálními optoelektronickými skenery. Jejich základní charakteristiky shrnuje tabulka 6.7. Družice IRS-1C může podobně jako SPOT snímat i mimo čáru nadiru v rozsahu $\pm 2,5$ stupňů. Z takto pořízených obrazových záznamů lze sestavovat stereoskopické dvojice.

6.5.2 Možnosti využití obrazových dat družic IRS

Vzhledem ke svému vynikajícímu prostorovému rozlišení nacházejí data z IRS-1C použití především v kartografii, při tvorbě přesných topografických map velkých měřítek a také jako kvalitní vstupní data do GIS. Vysoké prostorové rozlišení obrazových záznamů umožňuje mapování využití země v zastavěných oblastech, lze je kombinovat i s katastrální mapou nebo využívat v regionálním plánování. Data ze senzoru WiFS se také využívají v zemědělství, lesnictví, geologii, vodním hospodářství a globálních vegetačních studiích.

6.5.3 Budoucnost družic systému IRS

Do roku 2004 Indie plánuje vypuštění dalších čtyř družic, které mají poskytovat kvalitní obrazová data. Na rok 1999 je naplánováno vypuštění družice, která bude poskytovat panchromatické snímky s prostorovým rozlišením 2,5 metrů. Družice označovaná Cartosat-2 by později měla zprostředkovávat panchromatická data s prostorovým rozlišením pod 1 metr.

Informace o družicích IRS lze mimo jiné nalézt také na těchto adresách:

<http://www.gaf.de/euromap/>

<http://www.dtsi.com/h2rss.html>

¹) hodnota 5 dnů platí v případě snímání mimo čáru nadiru

<http://www.idi-ut.com/irs.htm>

6.6 Produkty ruských zpravodajských družic

Od počátku 90. let je možno ve stále větší míře využívat i snímky z archivů bývalého Sovětského svazu. Tato obrazová data byla pořízena z družic KOSMOS pohybujících se na nižších drahách než výše uváděné systémy (zhruba 220 km). Vyznačují se především vysokou prostorovou rozlišovací schopností, protože většinou jde o snímky pořízené z družic fotografickými systémy. Fotografie jsou většinou převáděny do digitální podoby. Jejich určitou nevýhodou potom je nižší radiometrická přesnost. Data z původních archivů zahrnující téměř celou zeměkouli jsou distribuována prostřednictvím západoevropských či amerických soukromých společností jak v původní analogové tak i digitální podobě. Příkladem snímacího zařízení je komora s označením KATE 200. Tyto snímky ve třech pásmech viditelné a blízké infračervené části spektra zabírají plochu 225 x 225 km s prostorovým rozlišením kolem 20 metrů. Dále je možné získat multispektrální i panchromatická obrazová data z MK 4 s rozlišením zhruba 8 metrů. Jedna scéna má velikost 170 x 170 km. Velmi kvalitní data pocházejí ze systému KFA 3000, jejichž prostorové rozlišení je až 2 metry.

Dalším příkladem jsou data označovaná jako SPIN-2. Tato zahrnují dva druhy obrazových dat. Prvním jsou fotografie pořízené kamerou TK-350 s prostorovým rozlišením asi 10 m. Tato kamera se podle CEBECAUERA (1996) vyznačuje ohniskovou vzdáleností 350 mm a snímá území o velikosti 200 x 300 km. Z překrývajících se sousedních snímků lze sestavovat dvojice pro stereoskopické vyhodnocení. Druhým typem dat SPIN-2 jsou snímky pořízené kamerou KVR-1000 s rozlišením 2 metry. Tato data lze zvětšovat až do měřítka 1 : 10 000 a mohou tedy být konkurencí leteckých měřických snímků.

Další informace o obrazových datech z ruských družic lze získat z prací CARRY (1994), CEBECAUERA (1996) nebo také na těchto webovských stránkách:

<http://www.gaf.de>

<http://cen.cenet.com/htmls/Services.html>

<http://www.eurimage.it/einet>

6.7 Produkty amerických zpravodajských družic

Se změnou politické situace na počátku 90. let byly postupně odborné veřejnosti zpřístupňovány archivy snímků pořízených v době studené války různými výzvědnými systémy. Vedle archivů snímků z bývalého SSSR jsou to i archivy ze Spojených států. Jedněmi z nejvýznamnějších jsou fotografie pořízené v rámci projektu s označením CORONA. Jde o systém amerických špionážních družic, který fungoval v období od roku 1960 do roku 1972. V jeho rámci byl vytvořen rozsáhlý archiv fotografií vybraných oblastí. Celý systém má počátek již v polovině 50. let, kdy bylo za pomoci letounu U-2 snímáno území bývalého Sovětského svazu. Na tyto aktivity navázal družicový systém CORONA. Šlo o sérii družic vypouštěných na subpolární eliptickou oběžnou dráhu s inklinací zhruba 77 stupňů o výšce letu od 200 km do 800 km. Jednotlivé lety družic trvaly zpočátku pouze jeden den, se zdokonalováním snímacího zařízení se na počátku 70. let jednotlivé lety prodlužovaly až na 16 dní (MacDONALD 1995). Na palubě družic byly umístěny fotografické komory s označením KEYHOLE (KH). Šlo o panoramatické kamery s obrazovým úhlem 70 stupňů a s ohniskovou vzdáleností 60 cm. V závěrečné fázi celého projektu byly na uvedené družici umístěny dvě takovéto komory, které byly orientovány se sklonem 15 stupňů před a za subsatelitní bod a

vytvářely tak stereoskopické dvojice snímků. Rozměr snímků byl přibližně 217 x 16 km (CAMPBELL 1996).

Současný archív snímků z projektu CORONA obsahuje téměř 900 tisíc fotografií. Kvalita a vypovídací schopnost velké většiny snímků je však degradována oblačností. Snímky pocházejí z období srpen 1960 až květen 1972. V naprosté většině případů jde o černobílé panchromatické snímky, část archívu však obsahuje i barevné a infračervené fotografie. U nejstarších fotografií je uváděna prostorová rozlišovací schopnost asi 12 metrů, v závěrečných stádiích projektu dosahovalo prostorové rozlišení hodnot lepších než 2 metry. Snímky pokrývají značné části území bývalého SSSR, ale i Evropy a Asie. Celý archív je od roku 1995 ve správě USGS a je dostupný také na Internetu jako jedna z položek archívu GLIS (<http://edcwww.cr.usgs.gov/Webglis/glisbin/glismain.pl>). Na uvedené adrese lze z archívu vybírat fotografie podle nejrůznějších kritérií a za poměrně nízký poplatek je objednat, a to v analogové i digitální formě. Další informace jako např. seznam jednotlivých misí, technické parametry komor apod. lze získat také na webovských adresách: <http://edcwww.cr.usgs.gov/declass/dclass.html>.
<http://edcwww.cr.usgs.gov/glis/hyper/guide/disp>

Uvedené fotografie představují především cenný historický materiál. Jak uvádí CAMPBELL (1996), pro některé oblasti tyto fotografie prodlužují dostupnou časovou řadu obrazových záznamů s poměrně kvalitním prostorovým rozlišením o více než 10 let před počátek družic a snímků systému LANDSAT. Představují tak hodnotná data například pro studium časových změn. Z dalších možných aplikací lze jmenovat geologii, archeologii či geografii obyvatelstva a sídel.

6.8 Některé z dalších družicových systémů

6.8.1 RESURS-O1

Jde o třetí ruskou družici stejné řady, vypuštěnou na oběžnou dráhu na konci roku 1994. Její hlavní funkcí je poskytovat přehledové snímky zemského povrchu především pro monitorování životního prostředí a inventarizaci přírodních zdrojů Země. Hlavní předností je, že družice poskytuje data poměrně promptně, záhy po jejich vytvoření, a frekvence snímání dané oblasti je vysoká. Oproti tomu obrazové materiály nabízejí ve srovnání s družicemi SPOT či LANDSAT nižší prostorový detail. Zaplňují tak mezeru mezi snímky ze zmíněných družic a snímky z družic NOAA.

Vlastní družice se pohybuje v průměrné výšce 678 km, po subpolární oběžné dráze, synchronní se Sluncem, s inklinací 98 stupňů. Snímací zařízení je představováno multispektrálním skenerem s označením MSU-SK. Uvedené zařízení vytváří obrazový záznam zemského povrchu o šířce 600 km v pěti intervalech spektra. Ve viditelné a blízké infračervené části spektra mají obrazové záznamy velikost pixelu 160 metrů, termální pásmo má prostorové rozlišení zhruba 600 metrů. Družice může snímat stejné místo na zemském povrchu i jedenkrát za čtyři dny, ve středních šířkách střední Evropy může systém poskytovat snímky dvakrát i třikrát do týdne. Uvedené prostorové rozlišení umožňuje sestavovat družicové mapy od měřítka 1 : 250 tisíc. Kvalitní radiometrie obrazových záznamů umožňuje snadnější porovnání jednotlivých snímků stejné oblasti.

Obrazových záznamů z družice RESURS-O1 je možné využít k monitorování lesních požárů, průběhu vegetačního období, průběhu procesů desertifikace, záplav, odlesňování, rozsahu sněhové pokrývky, procesů v příbřežních zónách apod. Na

webovských stránkách internetu je možné získat jak další informace o uvedené družici, tak i katalog snímků například na těchto adresách:

http://www.ssc.se/rst/rss/rs_app/resurs/frame/ppframe.html

http://cddis.gsfc.nasa.gov/920_1/RESURS.html

<http://tracy.esrin.esa.it:8001>

6.8.2 JERS-1

Japonská družice JERS-1 nese vedle radaru, jehož základní technické parametry jsou uvedeny v kapitole 5.8.5, také dva optické senzory s označením OPS.

OPS pracuje v multispektrálním režimu v 7 pásmech spektra v intervalu vlnových délek 0,52 až 2,40 mikrometrů. Prostorové rozlišení obrazových záznamů je 18 x 24 metrů. Systém obsahuje také blízké IČ pásmo, které může vytvářet obrazový záznam pod úhlem 15,3 stupňů před a za subsatelitní bod podél dráhy družice. To umožňuje vytvářet stereoskopické dvojice snímků odlišným způsobem, než je tomu u systému SPOT, který pořizuje stereodvojice kolmo k dráze letu, tedy ze sousedních obletů. Šířka záběru je stejně jako v případě radarového snímání 75 km. Informace o družici JERS a o snímcích z ní lze obdržet na adresách:

http://hdsn.eoc.nasda.go.jp/guide/guide/satellite/satdata/jers_e.html

http://hdsn.eoc.nasda.go.jp/guide/guide/images/evg/evg_index_e.html

6.8.3 SMALLSATS

Od poloviny 90. let umožnila americká legislativa vytvářet i soukromým firmám družicové systémy, které by poskytovaly obrazové záznamy zemského povrchu s vysokým prostorovým detailem. V průběhu času bylo anoncováno již několik systémů, které jsou souborně označovány jako SMALLSATS („malé družice“) nebo jako „1-metrové družice“, což by mělo být prostorové rozlišení těchto systémů. Informace o dokončování těchto systémů a jejich možném vypuštění do kosmu se často mění a postupně zpřesňují, jak v odborné literatuře (CORBLEY 1996a,b,c, KOLÁŘ et al. 1997, PAVELKA 1996), v propagačních materiálech jednotlivých organizací, tak i na webovských stránkách.

V současné době jsou asi nejbližší vypuštění družice společnosti EarthWatch. Společnost vyvíjí jednak komerční družici s označením EarlyBird, která by měla poskytovat obrazové záznamy s prostorovým rozlišením 3 metry v panchromatickém módu a 15 metrů v módu multispektrálním, jednak družici QuickBird s rozlišením panchromatických snímků lepším než 1 metr. Navrhované systémy by měly být vybaveny zařízením na pořizování stereoskopických dvojic snímků, a to jak ze sousedních drah družice, tak v rámci jednoho přeletu (natáčení senzorů před a za subsatelitní bod). Podle materiálů společnosti EarthWatch by družice měly být v blízké budoucnosti umístěny na oběžné dráhy tak, aby pro vybrané oblasti poskytovaly kvalitní snímky denně. Obrazové záznamy z družic by měly sloužit především jako informační vrstvy v GIS, pro tvorbu přesných družicových ortofotomap a monitorování časových změn v klasických oblastech aplikací, jako například zemědělství. Zájemce o další informace lze odkázat na práci PAVELKY (1996) a nebo na internetovské stránky:

EYEGLASS

<http://gde.gdesystems.com/IIS/ORIGINAL/eyeglass.htm>

SPACEIMAGING

<http://www.spaceimage.com/indexJS11.html>