



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra radioelektroniky

**Monitorování městských aglomerací pomocí satelitních
obrazových dat**

**Monitoring of Urban Agglomerations by the Use of
Satellite Image Data**

Diplomová práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Multimediální technika

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.

Bc. Martin Hlinovský

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hlinovský** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **406117**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Multimediální technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Monitorování městských aglomerací pomocí satelitních obrazových dat

Název diplomové práce anglicky:

Monitoring of Urban Agglomerations by the Use of Satellite Image Data

Pokyny pro vypracování:

- 1) Identifikujte problémy městských aglomerací, při jejichž analýze by bylo možné využít satelitní obrazová data (stavební činnost, doprava, změny v zalesnění, atd.).
- 2) Vypracujte přehled možných zdrojů satelitních obrazových dat.
- 3) Vypracujte přehled metod zpracování satelitních dat, zejména z ohledem na fyzikální interpretaci a na zvýšení rozlišení protorového rozlišení. vybrané metody implementujte v programovém prostředí Matlab.
- 4) Proveďte analýzu vybrané městské aglomerace.
- 5) Diskutujte možnosti fúze dat z různých zdrojů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] TRAUTH, Martin H., et al. MATLAB recipes for earth sciences. Berlin: Springer, 2007.
- [2] RICHARDS, John A.; RICHARDS, J. A. Remote sensing digital image analysis. Berlin et al.: Springer, 1999.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Stanislav Vitek Ph.D., 13137

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **13.02.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **31.08.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysoko-školských závěrečných prací.

Datum: 26. 5. 2017

.....

podpis diplomanta

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval Ing. Stanislavu Vítkovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování diplomové práce.

ABSTRAKT

Tato práce nejprve zmiňuje obecný princip dálkového průzkumu Země a dále popisuje dva volně dostupné zdroje satelitních dat družice řady Landsat a Sentinel. Následně podává přehled metod pro vylepšení prostorového rozlišení u družic, se kterými je dodáván panchromatický snímek a zhodnocuje účinnost jednotlivých metod. Poté následuje kapitola s možnými metodami zpracování obrazových satelitních dat. Při přímém využití se práce zabývá sledováním vlivu množství zeleně na teplotu města a na množství prachových částic. V poslední části sleduje průběh množství zeleně v Praze v roce 2015 a 2016 získané prahováním indexu NVDI a průběh množství zeleně od roku 1984 – 2016 získané prahováním indexu NVDI, EVI a druhé komponenty transformace Tasseled Cap.

Klíčová slova: Dálkový průzkum Země, Landsat, Copernicus, Sentinel, Pan-sharpening, Vegetační index, NVDI, EVI, Transformace Tasseled Cap, Tepelný ostrov města, Prachové částice, PM10

ABSTRACT

This paper first mentions the general principle of remote sensing and describes two freely available sources of satellite data Landsat and Sentinel. It then provides an overview of methods for improving spatial resolution for satellites with which a panchromatic image is delivered and evaluates the effectiveness of individual methods. The following is a chapter with possible methods for processing satellite image data. In direct use, the thesis deals with the monitoring of the influence of the amount of greenery on the city temperature and on the amount of particulate matter. In the last part, we monitor the amount of greenery in Prague in 2015 and 2016 obtained by thresholding the index NVDI and the amount of greenery from 1984 to 2016 obtained by thresholding the NVDI, EVI index and the second component of the Tasseled Cap transformation.

Keywords: Remote sensing, Landsat, Copernicus, Sentinel, Pan-sharpening, Vegetation index, NVDI, EVI, Transformation Tasseled Cap, Urban heat island, Particulate matter, PM10

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Princip snímání a přístroje na družicích.....	4
2.1	Absorpce	5
2.2	Odraz.....	5
2.2.1	Spektrální vlastnosti objektů	5
2.2.2	Vliv atmosféry.....	6
2.3	Přenos.....	8
2.4	Tepelné vyzařování	8
2.5	Celkový model	10
2.6	Pasivní přístroje.....	11
2.6.1	Fotografie a kamery	11
2.6.2	Digitální fotografie a kamery	13
2.6.3	Radiometr	13
2.6.4	Spektrometr	15
2.6.5	Spektroradiometr	15
2.6.6	Zobrazující Radiometr.....	15
2.7	Aktivní zařízení.....	17
2.7.1	Boční radar (SLAR)	17
2.7.2	Radar se syntetickou aperturou (SAR).....	19
2.7.3	Lidar (Light Detection And Ranging)	20
3	Družice.....	21
3.1	Vlastnosti družicových dat.....	22
3.1.1	Prostorové rozlišení.....	22
3.1.2	Spektrální rozlišení.....	23
3.1.3	Používaná frekvenční pásma.....	24

3.1.4	Radiometrická rozlišovací schopnost.....	26
3.1.5	Časová rozlišovací schopnost.....	26
3.1.6	Radarová data.....	27
3.1.7	Formát uložených dat.....	27
3.2	Landsat.....	28
3.2.1	Základní informace	28
3.2.2	Historie.....	28
3.2.3	Družice	29
3.2.4	Použitá zařízení	30
3.3	Projekt Copernicus	33
3.3.1	Základní informace	33
3.3.2	Historie.....	34
3.3.3	Družice	35
3.4	Fúze různých typů dat	37
4	Pan-sharpening.....	39
4.1	Vybrané metody.....	40
4.1.1	Průměrování	40
4.1.2	IHS fusion	40
4.1.3	Brovey transform (BT).....	42
4.1.4	Multiplicative method (MLT)	42
4.1.5	PCA method.....	42
4.1.6	Frequency Filtering method (HFF)	44
4.1.7	DCT based Image Fusion.....	45
4.1.8	DWT based Image Fusion.....	48
4.2	Hodnocení kvality.....	50
4.2.1	Joint quality measurement (JQM).....	52
4.2.2	MSE a PSNR.....	53

4.2.3	Výsledné hodnoty.....	55
5	Možné způsoby využití satelitních dat v městské aglomeraci	58
5.1	Krizové řízení.....	59
5.1.1	Ochrana před neštěstím.....	59
5.1.2	Pomoc po katastrofě.....	60
5.1.3	Vytvoření krizových zón.....	60
5.2	Území.....	61
5.2.1	Mapování stavu komunikací	61
5.2.2	Počítání počtu obyvatel.....	61
5.2.3	Růst města	62
5.2.4	Vyhodnocení volných ploch.....	62
5.2.5	Výškový model města.....	62
5.3	Znečištění Městem	62
5.3.1	Detekce míst s malou odrazivostí.....	63
5.3.2	Kvalita vegetace v městě a okolí.....	63
5.3.3	Ovzduší nad městem, složení vzduchu, množství oblačnosti.....	63
5.3.4	Teplota města	63
5.3.5	Znečištění vod v blízkosti města	63
6	Analýza hlavního města Prahy.....	64
6.1.1	Řízená a neřízená klasifikace	64
6.1.2	Neuronové sítě	65
6.1.3	Spektrální indexy	65
6.2	Vegetační indexy.....	67
6.2.1	Jiné indexy	70
6.3	Převod hodnot pixelů na odrazivost.....	71
6.4	Tepelný ostrov města	73
6.5	Výpočet teploty družice Landsat 4 – 8.....	74

6.6	Prachové částice	75
6.7	Vlastní rozbor.....	77
6.7.1	Vliv pan-sharpeningu na NVDI	77
6.7.2	Vliv pan-sharpeningu na teplotní snímek.....	83
6.7.3	Teplotní proměna města Prahy.....	87
6.7.4	Koncentrace částic PM10 v Praze.....	90
6.7.5	Změna indexu NVDI v průběhu roku	93
6.7.6	Změna zalesnění v Praze od roku 1984 do 2016.....	97
7	Závěr	103
8	Použitá literatura	105
Příloha A	.....	i
Seznam tabulek	.....	i
Seznam obrázků	.....	i
Příloha B	.....	v
Analýza hlavního města Prahy.....		v
Pan-sharpening.....		xvii
Příloha C	.....	xxi
Obsah příloženého nosiče		xxi

1 Úvod

Dálkový průzkum Země (DPZ) je metoda získávání informací o zemském povrchu, založená na bezkontaktním sběru údajů o objektech a jevech na povrchu Země. Při měření nedochází k fyzickému kontaktu měřicího zařízení s pozorovanými předměty.

Dálkový průzkum Země je podobný našemu zraku. Člověk svým zrakem pozoruje a hodnotí předměty okolo sebe a rozpoznává je na základě rozdílných barev, tvarů nebo například struktury. Můžeme je popsat pouze na základě vizuální informace a nepotřebujeme k tomu žádné další lidské smysly. Důležitou roli zde hraje vlastní zkušenost, neboť při sledování jiné osoby v oblečení lze na základě barvy nebo struktury výhradně určit, z jakého materiálu oděv má. Není nutné si k tomu přečíst visačku na zadní straně trička nebo se dotyčné osoby zeptat, z čeho je její svetr upletený. Při pozorování nemusíme zůstat pouze u určování vlastností oděvu, ale podle oblečení se můžeme snažit odhadnout pohlaví, věk, výšku nebo například ekonomickou situaci pozorované osoby.

Náš zrak vyměníme za digitální fotoaparát a místo sledování jednoho člověka vyfotografujeme plnou ulici lidí. Fotoaparát můžeme umístit na výškovou budovu a objektiv namířit na ulici pod ním. Na čip fotoaparátu dopadá světelné záření odražené od stojících aut, chodníku či lidí, dopadající fotony generují na čipu fotoaparátu elektrický náboj, který je úměrný odraženému záření. Náboj je převeden na napětí a z úrovní napětí jednotlivých obrazových bodů je vytvořen digitální obraz. Hodnoty pixelů ukazují množství odraženého záření od objektů na ulici. Místo skutečné scény získáme její digitalizovanou podobu. Na obrázku si opět můžeme vyhlédnout konkrétní osobu a provést stejnou analýzu jako v předchozím případě. Nespornou výhodou přístroje digitalizované podoby scény je její automatické zpracování, už se nemusíme spoléhat na náš zrak. Obraz lze automaticky klasifikovat, rozlišovat vyfotografované objekty podle barev, tvarů, velikostí nebo například struktury povrchu. Nevýhodou oproti předchozímu případu je, že ztrácíme subjektivní náhled na situaci, musíme se spolehnout pouze na počítačové algoritmy.

Při snímání závisí množství odraženého záření na spektrálních vlastnostech zdroje záření a spektrálních vlastnostech pozorovaných předmětů. Za denního osvětlení (slunce je širokopásmový zdroj záření) bude vegetace odrážet převážně v zelené části spektra. Pokud vyfotografujeme louku černobílým fotoaparátem, dostaneme černobílý snímek, tmavé části budou odpovídat málo a světlé části více osvětleným místům. Před černobílým fotoaparátem dáme postupně tři druhy filtrů, modrý, zelený a červený. Stejný snímek louky získaný nejprve s červeným a poté s modrým filtrem bude převážně tmavý, protože zelená tráva v této části

spektra odráží jen malé množství záření. Vlnové délky v tomto rozsahu jsou absorbované zeleným barvivem, chlorofylem. Fotografie se zeleným filtrem bude podobná černobílé fotografii. Pokud scénu snímáme přes různě barevné filtry, dostaneme sérii černobílých fotografií. Dalším příkladem může být vodní plocha. Voda se bude jevit kromě oblasti okolo modrých vlnových délek jako tmavá skvrna, pouze na základě obrázků pořízených přes různé filtry můžeme poznat, o jaké objekty na obraze jde.

Záznamová zařízení se nejčastěji umísťují na vrtulníky, letadla, bezpilotní letadla nebo umělé družice. Snímek povrchu Země se vyfotografuje z velké výšky, jeden obraz může zaujímat část kontinentu, oblast velkého města, pohoří, pole či louky. Výhoda pozorování prostoru z výšky je, že se mohou najít vztahy, které je ze země obtížné spatřit. Pokud člověk pozoruje scénu, jejíž je součástí, jen těžko spatří vztah mezi továrnou a znečištěným okolím, obtížně ohodnotí, kolik vyrostlo plodin na rozsáhlém poli ze zasetých semínek.

Při snímání zemského povrchu z větší vzdálenosti, se zaznamená více spojitostí a vztahů mezi rozdílnými objekty na Zemi. Proto se často umísťují snímací zařízení na umělé družice, i když jistou nevýhodou je určitá ztráta prostorového rozlišení a nelze ani očekávat, že na družicových obrázcích rozpoznáme například obličej lidí, které při filmování z vrtulníku vidíme. Další nevýhodou je dlouhá doba oběhu družice okolo Země, satelity totiž létají po předem definovaných drahách. Pokud se stane přírodní katastrofa v místě, nad kterým družice neprelétá, musí se počkat, až se na pozici neštěstí opět dostane. Naproti tomu dálkově řízené letadlo lze použít v místě aktuálního problému hned. Každý nosič snímacího zařízení má své přednosti a hodí se pro jiné situace.

Příkladem bezkontaktního získávání informací může být monitorování lesních požárů. Pokud vznikne rozsáhlý požár, je velice obtížné určit rozsah škod z pouhého pozorování ze země, neboť oheň hoří často na nepřístupných místech a velkých částech území. Na bezpilotní letoun se umístí RGB kamera a sleduje se rozsah a směr dalšího šíření požáru. Přestože to tak nevypadá, stále se měří spektrální charakteristiky objektů, kamerou se získá obraz v modré, zelené a červené části elektromagnetického spektra. Následně se složí do jedné barevné video sekvence. Druhou možností je využití termokamery, která snímá obraz v termálním pásmu. Opět se měří elektromagnetické záření. Tentokrát to není záření odražené, ale tepelné záření objektů. Při dálkovém průzkumu Země se získávají dvě hlavní informace o objektech, a to ze záření odraženého a vyzářeného. Termokamerou se sledují uhašená místa požáru, detekují se oblasti, kde by se oheň, mohl znovu rozhořet.

Obdobně se monitoruje únik tepla z průmyslových hal nebo velkých budov. Důvodem může být snaha o snížení energetické náročnosti budov nebo zmenšení tepelného znečištění

okolí. Mezi další možnosti použití dálkového pozorování patří například monitorování povodní, zemětřesení či sopečné činnosti. Lze využít družicových systémů pro zhodnocení celého rozsahu katastrofy nebo vzdušných prostředků k monitorování aktuální situace.

Podobné záběry jako snímky zatopeného města, města poničeného zemětřesením, zasypaného lavinou viděl každý z nás v televizních zprávách. To jsou příklady situací, kdyby družicové pozorování nebylo potřebné. Družicové snímky mají větší význam při výzkumu velkých částí území, například při sledování vzdušných nebo mořských proudů, vývoje počasí, odlesňování či desertifikace. Družice pořizují snímky území ve více částech frekvenčního spektra, je možné je využít v rozsahu od ultrafialového až po mikrovlnné záření, a tudíž lze snímané jevy studovat z více úhlů pohledu. V této chvíli může být předností, že družice obíhají Zemí po stále stejné dráze. Totéž území je po určitém časovém intervalu opět snímáno, a tak dostáváme sekvenci obrazů stejného území v následujících časech. Lze tedy sledovat časový vývoj situace.

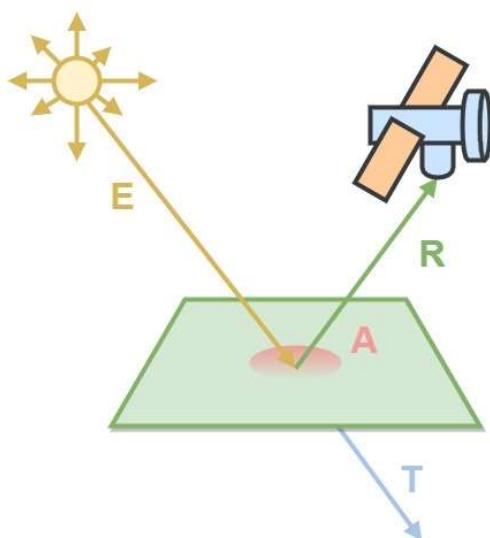
Velký význam mohou mít tato data v rozvojových zemích. Družicové snímky infrastruktury, silnic, železnic, zdrojů pitné vody, osad mohou patřit často mezi jediné dostupné informace o sledovaném území, zvláště pokud vlastníme dlouhodobé družicové záznamy. Všechny tyto poznatky by nejspíše bylo velmi obtížné získávat pozorováním z letadla nebo zcela nemožné pouhým sledováním ze zemského povrchu.

Většinou se tyto informace pořizují ve formě obrazových dat. Získání spektrálních informací o objektech ve formě obrazu je pro člověka velmi výhodné, a to z důvodu přirozeného způsobu zobrazení. Pokud se pořídí snímky v oblasti spektra, které lidské oko již nevidí, lze tyto údaje rovněž zobrazit jako obraz. Příkladem je zachycení tepelného vyzařování v barevné mapě, kde jsou teplá místa zobrazena červenou a studená místa modrou barvou. Když takový snímek předložíme neznalému člověku, ihned pozná, kde dochází k únikům tepla a bude moci na daný stav reagovat.

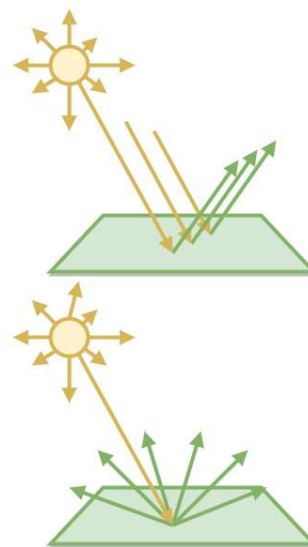
S postupným zvyšováním výpočetního výkonu počítačů je výhodné použít satelitní snímky v kombinaci s jinými druhy dat. Pokud máme dlouhodobou časovou řadu snímků deštného pralesa v Jižní Americe, vidíme na nich ubývání plochy zeleně. Určitě je zajímavé srovnat rychlost úbytků deštných pralesů například s ekonomickou nebo politickou situací v daných zemích. Rovněž můžeme porovnat velikost znečištění zdrojů pitné vody nebo přírody s úrovní průmyslového rozvoje dané země. Pokud se hledají vztahy mezi různými jevy, mohou družicové snímky přinést další zajímavé informace. Nevýhodou může být cena družicových snímků či dalších doplňkových dat.

2 Princip snímání a přístroje na družicích

Při dálkovém průzkumu Země se měří elektromagnetické záření odražené nebo vyzářené objekty na povrchu Země. Nejčastějším vnějším zdrojem záření je Slunce. Slunce se vyzářováním blíží záření absolutně černého tělesa při teplotě $T = 6000$ K. Sluneční paprsky, které urazí cestu od Slunce k Zemi, projdou atmosférou a interreagují s objekty na zemi. Můžeme rozlišit tři typy interakce – absorpci, odraz a přenos.



Obr. 2.1 A – Absorpce, R – Oraz, T – Přenos



Obr. 2.2 Zrcadlový a difuzní odraz

Podle zákona zachování energie platí, že součet spektrálních intenzit absorbovaného $A(\lambda)$, přeneseného $T(\lambda)$ a odraženého $R(\lambda)$ záření se rovná spektrální intenzitě ozáření $E(\lambda)$.

$$T(\lambda) + A(\lambda) + R(\lambda) = E(\lambda) \quad [W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}] \quad (2.1)$$

V následujících částech koeficient λ značí závislost veličiny na vlnové délce a vždy se tedy jedná o spektrální zář, případně o spektrální intenzitu záření, spektrální intenzitu ozáření či spektrální pohltivost, odrazivost nebo propustnost.

Absorpce, odraz a přenos závisí na vlnové délce záření, předměty v různých částech elektromagnetického spektra absorbují, odráží nebo přenáší jiné množství záření. Charakteristiky jsou dány především strukturou povrchu a elektrickými vlastnostmi látek (permitivita, vodivost, permeabilita). V obecném případě závisí tyto veličiny také na úhlu a směru, ve kterém dopadá elektromagnetické záření na objekt nebo také na polarizaci elektromagnetické vlny.

Při pasivním měření (zdrojem záření je ve většině případů Slunce) se měří odraz a z toho plyne omezení snímání během dne. Absorpce, případně přenos se uplatňují především u aktivních metod měření. Zdrojem záření může být například laser. Máme informaci o intenzitě vyslaného a přijatého paprsku a lze například určovat absorpci materiálu na dané vlnové délce.

2.1 ABSORPCE

Sluneční paprsky jsou absorbovány materiálem, na který dopadají. Může dojít k přeměně záření například na teplo a k opětovnému vyzaření. Veličina, která udává množství absorbovaného záření, se nazývá pohltivost (absorbance) α_λ .

$$\alpha_\lambda = \frac{A(\lambda)}{E(\lambda)} \quad [-] \quad (2.2)$$

Pohltivost je poměr mezi intenzitou pohlceného záření k intenzitě ozáření. Pohltivost stejně jako odrazivost a propustnost nabývají hodnot z intervalu $\langle 0,1 \rangle$. Při hodnotě 0 daný povrch neabsorbuje žádné záření a naopak při hodnotě 1 absorbuje záření vše.

2.2 ODRAZ

Záření se odráží od předmětů zpátky do prostředí, ze kterého přichází. Spektrum odraženého záření závisí na spektrálních vlastnostech materiálu. Veličina, která udává množství odraženého záření, se nazývá odrazivost (reflektance) ρ_λ .

$$\rho_\lambda = \frac{R(\lambda)}{E(\lambda)} \quad [-] \quad (2.3)$$

Odrazivost dává do poměru odražené záření k dopadajícímu záření. Podle obr. 2.2, rozlišujeme dva základní typy odrazů. Při velmi hladkém povrchu dochází k zrcadlovému odrazu, všechno záření nebo skoro všechno je odraženo od povrchu do jednoho směru viz obr. 2.2 horní část, opačným případem je odraz difuzní viz obr. 2.2 dolní část. K difuznímu odrazu dochází, pokud je povrch dostatečně drsný a záření se odráží do všech směrů rovnoměrně. Většina zemských povrchů se pohybuje někde mezi dokonale zrcadlovým a difuzním povrchem.

2.2.1 Spektrální vlastnosti objektů

Odrazivost závisí na vlnové délce, rozdílné předměty odrážejí na různých frekvencích jiné množství energie. Například vegetace odráží nejvíce záření v zelené a blízké infračervené části

elektromagnetického spektra, na rozdíl od vodních ploch, které budou odrážet záření hlavně v modré části spektra. Když se podíváme na vodní plochy v infračervené části, budou se jevit jako černé, neodráží téměř žádné záření.

Objekty můžeme rozlišit podle jejich spektrálního chování. Pro každý předmět lze sestavit křivku závislosti spektrální odrazivosti na vlnové délce. Pokud máme snímky z více částí elektromagnetického spektra (multispektrální snímky), tak mohou být objekty rozpoznány na základě jejich spektrálních vlastností.

2.2.2 Vliv atmosféry

K odrazu záření nedochází pouze od předmětů na Zemi. Záření se odráží také na částech vzduchu. Mezi měřicím senzorem a zemským povrchem je atmosféra, která ovlivňuje naměřené hodnoty viz obr. 2.3. V atmosféře dochází k absorpci, rozptylu, refrakci, difrakci, disperzi a k odrazu záření na molekulách vzduchu. Jevy budou silnější, čím delší bude dráha průchodu paprsku tímto prostředím viz obr. 2.3 zelený paprsek a současně také závislé na frekvenci a intenzitě procházejícího paprsku. Pokud budeme zkoumat předměty dálkovým průzkumem Země, je nutné počítat s ovlivňováním naměřených údajů atmosférou.

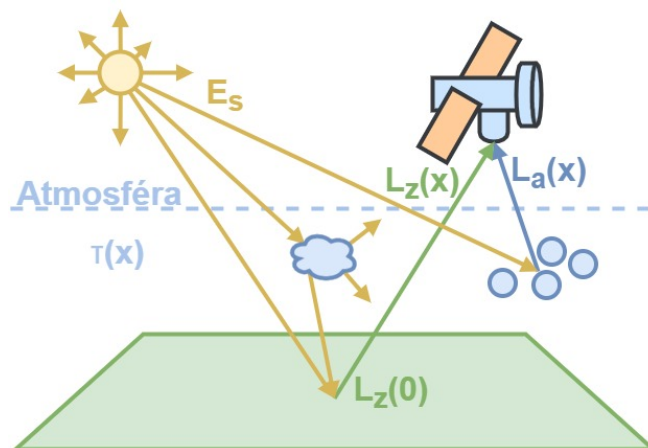
Silně nežádoucí je absorpce a rozptyl záření, neboť způsobují velký útlum elektromagnetické vlny. Při absorpci předá vlna část své energie molekulám vzduchu, se kterými přijde do kontaktu. Vlna je nejvíce zeslabena, pokud se její frekvence shoduje s frekvencí rotačního a vibračního pohybu molekul. Tyto frekvence tvoří takzvané absorpční pásy, které jsou charakteristické pro jednotlivé plyny.

Rozptyl záření závisí na vlnové délce a velikosti molekuly, je způsoben odrazem a lomem vlny na nehomogenitách atmosféry. Za nehomogenity se mohou považovat všechny částice ve vzduchu. Můžeme rozlišit molekulový a aerosolový rozptyl. Molekulový rozptyl je rozptyl záření na molekulách vzduchu, částech prachu, sněhu, ledu způsobují aerosolový rozptyl.

Atmosféra je charakterizována svou propustností, podle vztahu 2.4. V zjednodušeném případě je celková propustnost atmosféry τ součin absorpční propustnosti molekul vzduchu τ_α a propustnosti rozptylu záření. Propustnost rozptylu lze rozdělit na propustnost rozptylu na aerosolech τ_{ar} a propustnost rozptylu na molekulách τ_{mr} .

$$\tau = \tau_{mr} \cdot \tau_{ar} \cdot \tau_\alpha \quad [-] \quad (2.4)$$

Naměřené hodnoty je nutné opravit s ohledem na tyto vlivy, jejich odhad je většinou velice náročný úkol.



Obr. 2.3 Přenos atmosférou

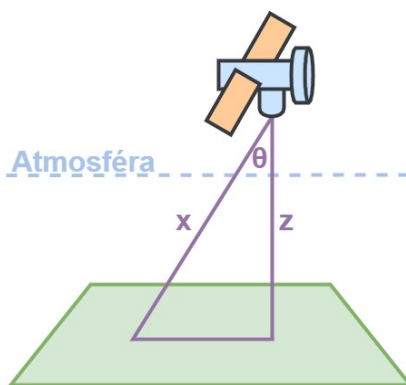
Záření dopadající na detekční zařízení se skládá ze záření odraženého od povrchu Země a ze záření odraženého od částic vzduchu. Zdrojem záření ze zemského povrchu je zář $L_z(0)$ viz obr. 2.3, která je modifikovaná propustností atmosférou.

Zář slouží k popisu zdroje záření a vyjadřuje velikost zářivého toku, který je v tomto případě odražený povrchem a dopadne na senzor.

V místě pohybu družice se může psát výsledná spektrální zář $L'_\lambda(x)$ jako součet spektrální záře povrchu země modifikované atmosférou $L_{\lambda z}(x)$ a spektrální záře odražené od molekul vzduchu $L_{\lambda a}(x)$ podle rovnice 2.5. Rovnice 2.5 se nazývá přenosová funkce atmosféry a vyjadřuje velikost spektrální záře v místě aktuální polohy družice. V tomto zápise je zanedbaný vícenásobný odraz záření od zemského povrchu, uvažuje se zjednodušený model.

$$L'_\lambda(x) = L_{\lambda z}(x) + L_{\lambda a}(x) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}] \quad (2.5)$$

Zkoumaný předmět je od místa pozorování vzdálen x , pohyblivý nosič má výšku nad zemí z a svírá se subjektem úhel θ . Odražený paprsek musí od objektu urazit určitou vzdálenost x volným prostředím, které ho ovlivňuje viz obr 2.4.



Obr. 2.4 Vzdálenost měřícího senzoru od zkoumaného předmětu

Skutečná zář objektu $L_{\lambda z}(0)$ se liší od naměřené hodnoty o propustnost atmosféry $\tau(x)$ a zář vzniklou odrazem slunečního záření od částeczek vzduchu. Pouze pro zář objektu změněnou průchodem atmosférou lze napsat vztah 2.6.

$$L_{\lambda z}(x) = \tau_{\lambda}(x) \cdot L_{\lambda z}(0) \quad (2.6)$$

Při předpokladu lambertovského povrchu (objekt odráží do všech směrů stejně) lze celkovou odraženou spektrální intenzitu záření R_{λ} objektu přepsat do následujícího vztahu 2.7.

$$R_{\lambda} = \pi \cdot L_{\lambda z}(0) \quad (2.7)$$

Dále se odražené záření rovná součinu odrazivosti a spektrální intenzity ozáření E_{λ} podle vztahu 2.3 přepsaného do 2.8. Intenzitu ozáření lze rozepsat na intenzitu ozáření přímým $E_{\lambda p}$ a intenzitu ozáření nepřímým (difuzním) $E_{\lambda d}$ slunečním zářením.

$$R_{\lambda} = \rho_{\lambda} \cdot E_{\lambda} = \rho_{\lambda} \cdot (E_{\lambda p} + E_{\lambda d}) \quad (2.8)$$

Přímé sluneční záření, je záření, které není rozptylováno mraky nebo částeckami v atmosféře, v opačném případě dochází k difuznímu záření, které může přicházet ze všech směrů. Kombinací vztahů 2.5 – 2.8 získáme výsledný vztah 2.9.

$$L'_{\lambda}(x) = \tau_{\lambda}(x) \cdot \frac{\rho_{\lambda}}{\pi} \cdot (E_{\lambda p} + E_{\lambda d}) + L_{\lambda a}(x) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}] \quad (2.9)$$

Změřená hodnota záře není dána pouze vlastnostmi sledovaného povrchu, popřípadě zdroje záření, při dálkovém průzkumu Země se musí započítat i vlivy atmosféry.

2.3 PŘENOS

Při přenosu prochází záření skrz objekty. Množství procházejícího záření je popsáno veličinou nazývanou propustnost (transmitance) τ_{λ} .

$$\tau_{\lambda} = \frac{T(\lambda)}{E(\lambda)} \quad [-] \quad (2.10)$$

Propustnost je podíl prošlého záření k dopadajícímu záření.

2.4 TEPELNÉ VYZAŘOVÁNÍ

Každý objekt, který má teplotu větší než absolutní nula $T = 0 \text{ K}$ nebo $T = -273 \text{ °C}$, vyzařuje energii ve formě elektromagnetického záření. Tepelné záření vzniká tepelným pohybem částic v předmětech, tepelný pohyb je neustálý neuspořádaný pohyb částic v látkách. Částice vykonávají posuvný, otáčivý nebo kmitavý pohyb, který probíhá ve všech skupenstvích látek.

Tepelné vyzařování absolutně černého tělesa je popsáno Planckovým vyzařovacím zákonem, intenzita záření se mění s teplotou. S rostoucí teplotou se posouvá maximum vyzařování směrem ke kratším vlnovým délkám. Například železná tyč se zvyšující se teplotou bude postupně měnit barvu od černé, přes žlutou, červenou až k modré barvě. Tato vlastnost je popsána Wienovým posunovacím zákonem, kde λ_{max} je vlnová délka maxima vyzařování.

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad [\text{mm}] \quad (2.11)$$

Proměnná T je teplota předmětu v Kelvinech a b je konstanta. Povrch Země má teplotu okolo 300 K, ve stupních Celsia to je okolo 27 °C.

$$\lambda_{max} = \frac{2,898}{300} = 0,0097 \quad (2.12)$$

Teplotě 300 K odpovídá vlnová délka $\lambda = 9,7 \mu\text{m}$, maximum vyzařování zemského povrchu je v infračervené oblasti. To je důležité při konstrukci tepelných senzorů, které musí být citlivé právě v této oblasti, zde je tepelné vyzařování Země největší. Stejným způsobem lze vypočítat vlnovou délku maxima vyzařování Slunce.

$$\lambda_{max} = \frac{2,898}{6000} = 0,00048 \quad (2.13)$$

Slunečnímu záření odpovídá maximum vyzařování ve viditelné oblasti spektra okolo 480 nm.

Při snímání povrchu Země se neměří pouze záření odražené od povrchu, ale i vlastní vyzařování předmětů. Spektrum vyzařování předmětů je popsáno Planckovým vyzařovacím zákonem pro absolutně černé těleso a závisí na teplotě objektů.

Skutečné předměty nevyzařují jako ideálně černé těleso, nedochází u nich k dokonalé přeměně tepelné energie na zářivou. Tato skutečnost je vyjádřena emisivitou povrchu ϵ_λ podle vztahu 2.14.

$$\epsilon_\lambda = \frac{M(\lambda)}{M_\epsilon(\lambda)} \quad [-] \quad (2.14)$$

Emisivita povrchu je poměr mezi spektrální intenzitou vyzařování reálného předmětu $M(\lambda)$ s teplotou T a spektrální intenzitou vyzařování absolutně černého tělesa o stejné teplotě $M_\epsilon(\lambda)$. Spektrální intenzita vyzařování reálných objektů je vždy nižší, než je spektrální intenzita vyzařování absolutně černého tělesa.

Stejně jako záření odražené i záření emitované než dopadne na měřicí čip je ovlivňováno prostředím, kterým prochází. Pro přenosovou funkci lze psát obdobný vztah jako 2.5 s rozdílem,

že zář země se nahradí vtahem pro spektrální vyzařování absolutně černého tělesa $M_{\lambda\epsilon}(T)$ o dané teplotě a emisivitě.

$$L_{\lambda t}(x) = \tau_{\lambda}(x) \cdot \frac{\epsilon_{\lambda}}{\pi} \cdot M_{\lambda\epsilon}(T) \quad (2.15)$$

Dále dochází k tepelnému vyzařování molekul vzduchu směrem k senzoru $L_{\lambda at}(x)$.

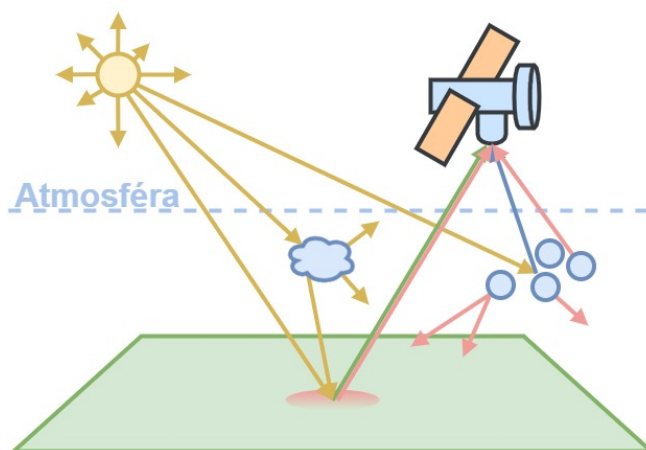
$$L_{\lambda}''(x) = L_{\lambda t}(x) + L_{\lambda at}(x) \quad (2.16)$$

Atmosféra vyzařuje buď přímo směrem k senzoru, nebo je zdrojem záření, které dopadá na předměty na zemi a dochází k odrazu zpět k senzoru. Přispívá ke slunečnímu záření viz obr. 2.5 červené šipky od molekul k zemi, toto již v rovnici 2.16 uvedené není.

2.5 CELKOVÝ MODEL

Celková zář $L_{\lambda}(x)$ dopadající na senzor je dána kombinacemi těchto faktorů.

$$L_{\lambda}(x) = L_{\lambda}'(x) + L_{\lambda}''(x) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}] \quad (2.17)$$



Obr. 2.5 Přenos atmosférou a vliv tepelného záření

Obrázek 2.5 znázorňuje zjednodušený model dálkového průzkumu Země. Primárním zdrojem záření je Slunce. Na objekty na zemi dopadá sluneční záření přímé a difuzní (rozptýlené například v mracích) a dochází k odrazu v závislosti na odrazových vlastnostech povrchů objektů. K odraženému záření se dále přidává záření emitované předměty na zemi, které po průchodu atmosférou dopadá také na senzor. K těmto zářením se ještě přičítá záření odražené na molekulách vzduchu a vlastní tepelné záření molekul vzduchu. Tepelné záření atmosféry může dopadat na měřicí zařízení přímo nebo dopadat spolu se slunečním zářením na zemi a odrážet se zpět k nosiči a jeho senzoru [1; 2; 3; 5; 11].

2.6 PASIVNÍ PŘÍSTROJE

Na družicích jsou umístěná zařízení, která dopadající záření měří. Systémy získávající informace o zemském povrchu lze rozdělit na pasivní a aktivní. Pasivní zařízení měří záření odražené od předmětů na Zemi nebo jimi emitované. Aktivní zařízení také získávají informace o předmětech na Zemi přes odražené a emitované záření, ale monitorovací systémy jsou současně i zdrojem záření. Při pasivním snímání je na nosiči umístěn senzor, který sleduje určitou plochu území a měří zářivý tok. Zářivý tok dopadající na senzor závisí na záři plochy, kterou sleduje, na ploše objektivu a zorném úhlu objektivu. Vztah pro výstupní veličinu senzoru V lze zapsat podle vzorce 2.18.

$$V = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) R(\lambda) T(\lambda) d\lambda \quad (2.18)$$

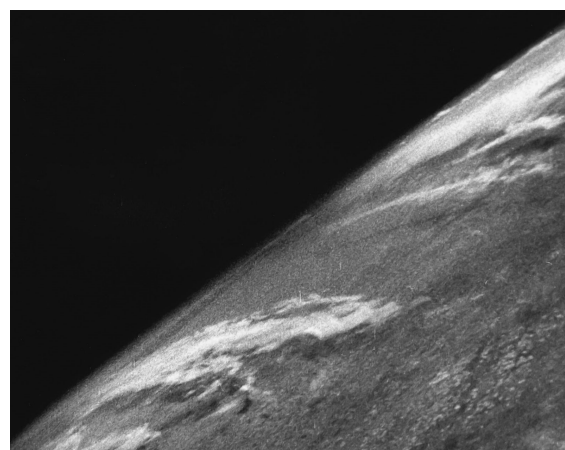
Senzor měří zářivý tok v určitém intervalu $\lambda_1 - \lambda_2$ daném spektrální děličem, je to tzv. šířka spektrálního pásma, ve kterém senzor pracuje. Výstupní hodnota je dána součinem spektrálních vlastností zářiče a objektu, které generují zářivý tok $\Phi(\lambda)$ a vlastnostmi senzoru: jeho spektrální odezvou $R(\lambda)$ a propustností $T(\lambda)$. Spektrální odezva je reakce senzoru na dopadající zářivý tok, je to převodní vztah mezi dopadajícím zářivým tokem a výstupní veličinou. Propustnost vyjadřuje, kolik záření se dostane na část senzoru, která je zodpovědná za přeměnu zářivého toku ve výstupní veličinu.

2.6.1 Fotografie a kamery

První kdo pořídil fotografii země ze vzduchu, byl francouzský vzduchoplavec a fotograf Nadar vlastním jménem Gaspard-Félix Tournachon. Nadar fotografoval roku 1858 Paříž z balónu, tento vůbec první snímek ze vzduchu se do dnešní doby nedochoval. První dochovaný obrázek je fotografie Bostonu, snímek pořídil americký fotograf James Wallace Black v roce 1860 také z balónu. Velký rozvoj pozemního snímkování nastal za první a druhé světové války, kdy bylo potřeba zdokumentovat nepřátelské území a postavení nepřátelských vojsk. První snímek Země z vesmíru byl pořízen 24. října 1946. Pořídila ho raketa V-2, kterou za druhé světové války německá armáda používala k ostřelování spojeneckých měst. Po konci války se dostala do rukou Američanů, kteří ji využili k výzkumným účelům. Na obrázku vlevo je fotografie části Bostonu z roku 1860, na snímku vpravo je povrch Země pořízený raketou V-2.



Obr. 2.6 Fotografie Bostonu



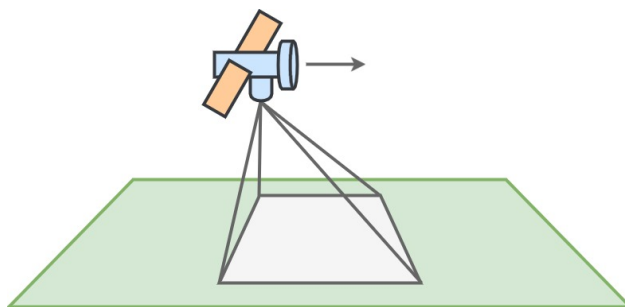
Obr. 2.7 První snímek Země z vesmíru

Zdroj: Levý obrázek je převzat ze stránky [44] a pravý obrázek je převzat ze stránky [45]

Fotografie využívá reakce dopadajících fotonů s fotocitlivou vrstvou, která je nejčastěji tvořena bromidem stříbrným rozpuštěným v želatině. Dopadající fotony reagují s bromidem stříbrným, při dopadu světla na fotocitlivou vrstvu dochází k ztmavnutí materiálu.

Prostorová rozlišovací schopnost filmu je dána velikostí zrn. Pokud jsou zrna velká, film je velice citlivý, ale dojde ke ztrátě prostorového rozlišení. Při malých zrnech je rozlišovací schopnost filmu větší za cenu ztráty citlivosti. Barevný film se vytvoří použitím barevných filtrů.

Zorný úhel objektivu je stejný jako na obr. 2.10 pro skenery. Ohniskové vzdálenosti, které se například používají, jsou 90 mm, 210 mm nebo 152 mm. Čím větší je ohnisková vzdálenost, tím menší oblast na zemi je zaměřena. Při fotografování dochází k expozici celé části území ve stejný okamžik viz obr 2.8. Snímaná scéna je přes optický systém zobrazena do obrazové roviny fotografického filmu.



Obr. 2.8 Pořizování snímků fotoaparátem a kamerou

Film bývá citlivý na oblast záření od 0,3 μm do 0,9 μm vlnové délky, fotografie se nejčastěji používá pro získání panchromatických snímků.

Mezi používané kamery patřil například systém RVB (Return Beam Vidicon), toto zařízení bylo umístěno na družicích Landsat 1 – 3. Systém se skládal ze tří kamer, které pracovaly v modro-zeleném, žluto-červeném a blízkém infračerveném pásmu.

2.6.2 Digitální fotografie a kamery

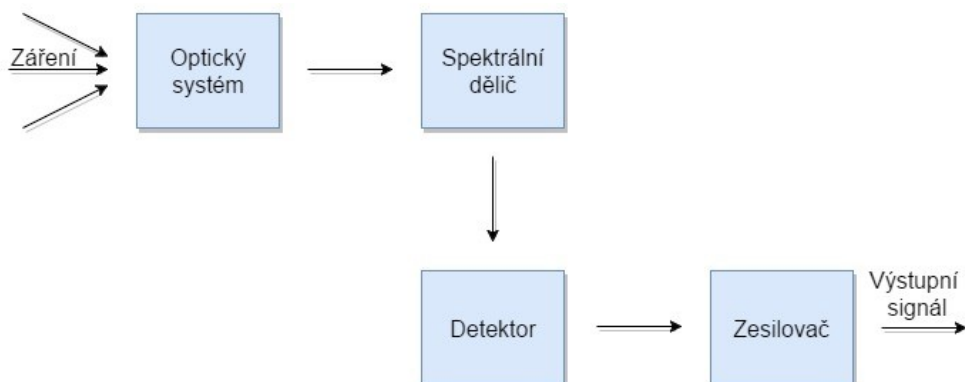
Digitální fotoaparát, stejně jako analogový fotoaparát, pořídí snímek celého území najednou viz obr. 2.8. Záření však nedopadá na fotocitlivý materiál, ale na elektronický čip. Dopadající záření generuje elektrický náboj, který je následně zpracován a měřen.

Digitální fotografování je také podobné elektrooptickému skeneru, který je zmíněn níže. Rozdílem je, že snímek nevzniká postupně skenováním povrchu Země řádek po řádce, ale najednou.

V současné době se používají například termovizní kamery, které se umísťují na letadlech nebo vrtulnicích pro monitorování tepelného znečištění.

2.6.3 Radiometr

Radiometr je zařízení, které měří velikost odraženého nebo emitovaného elektromagnetického záření. Na následujícím obrázku je blokové schéma radiometru.



Obr. 2.9 Radiometr

Elektromagnetické vlny vstupují do zařízení přes optický systém. Optický systém se skládá z čoček a zrcadel, které směřují záření na spektrální dělič, ten vybere měřený spektrální rozsah. Vybrané vlnové délky záření poté dopadají na detektor. Detektor je vyroben z látky, která mění svůj odpor v závislosti na dopadajícím záření. Součástí detektoru jsou obvody, převádějící změnu odporu na proud nebo napětí. Detektor transformuje vstupní záření na elektrickou veličinu a poté je signál zesílen a dále upravován. Radiometry mohou teoreticky měřit záření od gama až pod dlouhé mikrovlnné záření.

Změnu výstupní elektrické veličiny V radiometru na vstupním zářivém toku Φ vyjadřuje odezva senzoru R .

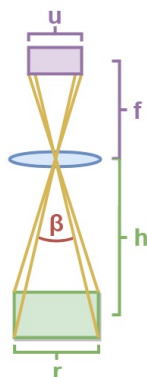
$$R = \frac{V}{\Phi} = \frac{V - V_n}{\Phi - \Phi_n} \quad (2.19)$$

Veličina Φ_n udává nejmenší zářivý tok, který může být ještě změřen, detektor není schopen měřit tok záření menší, než je práh detektoru. Části radiometru totiž produkují rušivé záření Φ_n , které vytvoří vnitřní šum, výstupní veličina odpovídající vnitřnímu šumu je V_n .

Vztah 2.20 vyjadřuje citlivost detektoru D , ta se vypočítá z převrácené hodnoty šumu.

$$D = \frac{1}{\Phi_n} \quad [W^{-1}] \quad (2.20)$$

Pokud dopadající zářivý tok přesáhne určitou úroveň větší než je maximální práh detektoru Φ_{max} , tak dojde k zahlcení detektoru. Detektor poté odpovídá pouze svou maximální výstupní hodnotou V_{max} , přestože zářivý tok může být větší.



Obr. 2.10 Zorné pole

Zelená oblast představuje právě snímané území, modrý ovál je optická soustava a fialová oblast je plochu detektoru, na kterou dopadá záření z pozorovaného území. Velikost zorného pole vyjadřuje úhel β .

$$\beta = 2 \cdot \tan^{-1} \frac{u}{2 \cdot f} \quad [^\circ] \quad (2.21)$$

Zorné pole jednoho detektoru závisí na šířce detektoru u a vzdálenosti čočky od detektoru f . Plocha S vymezená zařízením ve výšce h a úhlem β se určí podle vztahu 2.22 a 2.23.

$$r = 2 \cdot h \cdot \tan \frac{\beta}{2} = h \cdot \frac{u}{f} \quad [m] \quad (2.22)$$

$$S = r^2 \quad [m^2] \quad (2.23)$$

S je prostorové rozlišení detektoru, plocha, kterou snímá detektor. Obrázek 2.10 a vztahy 2.21 - 2.23 platí obecně i pro zorné pole klasického i digitálního fotoaparátu a lidského oka. V případě fotoaparátu představuje fialová plocha fotocitlivou vrstvu nebo u digitálního fotoaparátu CCD nebo CMOS čip.

2.6.4 Spektrometr

Spektrometr je zařízení, určující obsažené vlnové délky v dopadajícím záření.

2.6.5 Spektorradiometr

Spektorradiometr měří dopadající záření ve více spektrálních pásmech, pořizuje multispektrální snímky. Spektorradiometr rozloží vstupní tok za použití spektrálních filtrů. Záření v rozsahu určitých vlnových délek poté dopadá na jednotlivé radiometry. Jeden radiometr měří pouze rozsah vymezený použitým filtrem.

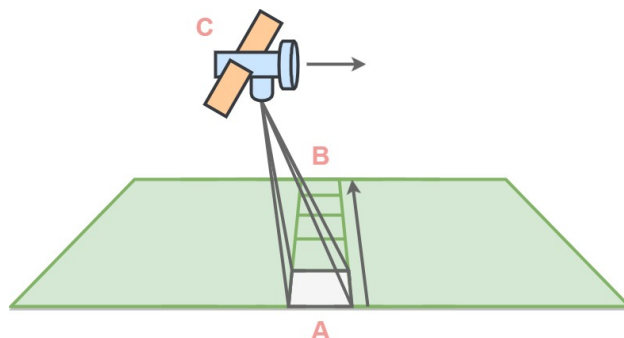
Nejčastěji používané filtry jsou optické, lze je rozdělit na absorpční a interferenční. Absorpční filtry mohou být zhotoveny například z obarveného skla nebo plastu a pohlcují záření v určitém rozsahu vlnových délek. Interferenční filtry jsou založeny na interferenci vlnění a propouští pouze úzký svazek záření. Další možností je využití disperzní mřížky, ta při rozkladu pracuje s odrazem nebo lomem světla. Pro rozklad záření lze také použít polopropustných zrcadel nebo optického hranolu.

2.6.6 Zobrazující Radiometr

Zobrazující radiometr skenuje povrch země a z hodnot odraženého nebo emitovaného záření vytvoří dvourozměrnou mapu. Zařízení nezískává informace pouze ve směru letu (trasující radiometr), ale i kolmo k dráze letu. Velikost odražené nebo emitované energie ze zemského povrchu lze zobrazit jako obrázek. Nejběžnějším typem zobrazujícího radiometru je mechanický a elektrooptický skener.

Mechanický skener (Across-track scanner)

Skener v jeden okamžik snímá pouze jeden obrazový bod viz obr. 2.11 bod A. Zařízení obsahuje rotující zrcadlo bod C. Zrcadlem je měněn směr, z kterého je přijímán zářivý tok. Snímač skenuje postupně celý řádek, kolmý na směr pohybující se družice až k bodu B.

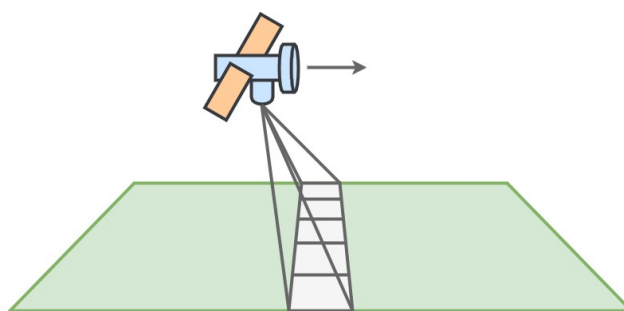


Obr. 2.11 Mechanický skener

Záření po průchodu optickou soustavou může být rozloženo na různé vlnové délky. Jednotlivá pásma jsou snímána jiným detektorem, spektrální rozlišení skeneru určuje počet možných pásem. Prostorové rozlišení je dáno velikostí plochy, která je pozorována a maximální vychýlení rotujícího zrcadla udává šířku jednoho záběru. Zařízení umístěná na letadlo mají úhel záběru okolo $90^\circ - 100^\circ$, družice mohou mít úhel záběru menší například $10^\circ - 20^\circ$. Satelit letí výše a vidí najednou větší plochu. Z důvodu zvětšující se vzdálenosti k okrajům dochází u krajních pixelů k vzniku specifických zkreslení.

Elektrooptický skener (Along-track scanner)

Elektrooptický skener na rozdíl od mechanického pořizuje najednou celý řádek. Družice opět snímá území kolmé na dráhu svého letu. Snímač obsahuje pole detektorů, každý senzor měří dopadající záření z jednoho elementu plochy. Pro různá spektrální pásma je jiné pole detektorů. Zářetí vstupující do optické soustavy se rozdělí filtry a směřuje k detektorům citlivým na tyto vlnové délky.



Obr. 2.12 Elektrooptický skener

Tento princip má oproti předchozímu některé výhody, celý řádek je snímán najednou, a tudíž může být pozorován déle. Tím lze docílit většího prostorového, radiometrického a spektrálního rozlišení. Dále neobsahuje žádné mechanické vychylování a má delší životnost. Na druhé straně kalibrace tisíců senzorů pro skenování jedné řádky je velice náročná [1; 2; 3; 6; 11].

2.7 AKTIVNÍ ZAŘÍZENÍ

Tyto zařízení používají svou vlastní energii k ozáření předmětů na povrchu země a následně měří energii odraženou.

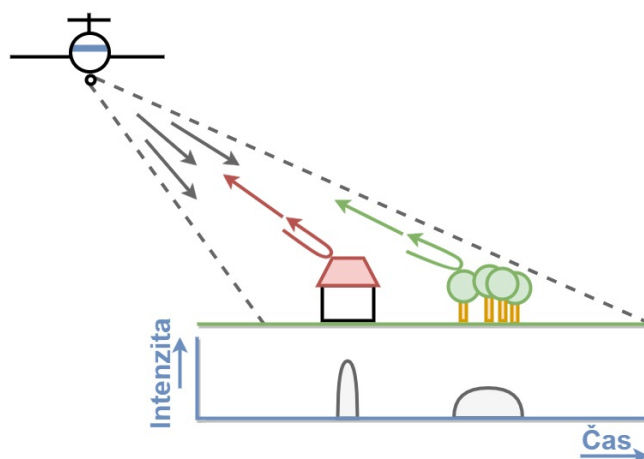
Radar (Radio Detection And Ranging)

Radar pracuje v mikrovlnné oblasti spektra a má určité výhody oproti pasivním zařízením. Není závislý na sluneční aktivitě. Zařízení je možné používat v noci nebo v polárních oblastech, za nízké sluneční aktivity. Mikrovlnné záření dobře proniká mraky, mlhou, prachem nebo třeba dýmem. Je ho možné použít i za špatného počasí. Například při sledování povodní je často obtížné využít pasivní zařízení z důvodu vysoké oblačnosti. Na radarových snímcích je dobře vidět rozlévající se řeka.

Odrážené mikrovlnné záření je formované spíše obsahem vody, drsností povrchu nebo dielektrickými vlastnostmi předmětů. V mikrovlnné části spektra se objekty mohou jevit úplně odlišně než v optické části.

2.7.1 Boční radar (SLAR)

Pohyblivý nosič má na svém boku umístěný radar. Radar skenuje území kolmo na směr letu viz obr 2.13.



Obr. 2.13 SLAR čelní pohled

Anténa vyšle elektromagnetický puls o velké intenzitě, puls má trvání v řádu mikrosekund. Následně se anténa přepne do přijímacího režimu a přijímá odražené záření od předmětů na zemi, měří se intenzita a doba příchodu odraženého paprsku. Z doby příchodu paprsku se vypočítá vzdálenost objektu od nosiče SR podle vztahu 2.24. Z naměřených údajů se postupně vytváří dvourozměrný obraz. Do obrazové matice se vynáší pozice a velikost odražené energie.

$$SR = \frac{c \cdot t}{2} \quad [m] \quad (2.24)$$

Ve vztahu je c rychlost šíření elektromagnetické vlny a doba příchodu vlny od vyslání pulsu t .

Příčné rozlišení

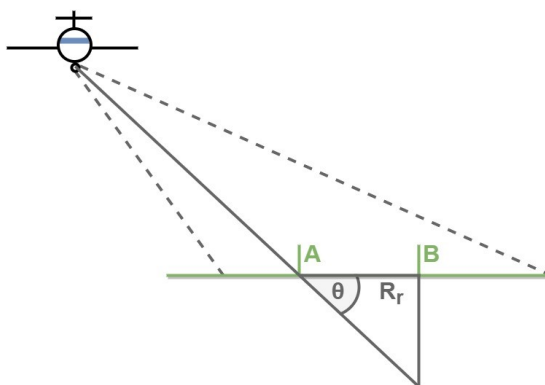
Radarové snímání má jistá specifika oproti předchozím typům, jedním z nich je jiné rozlišení v příčném a podélném směru.

Dva objekty na zemi budou rozpoznány, pokud se jejich odražené paprsky vrátí v různý čas. Paprsky nesmí přijít na přijímací anténu současně, jinak nedojde k jejich rozlišení. Objekty budou odděleny, když jejich šikmá vzdálenost bude větší než polovina délky pulzu. Na obr. 2.13 je šikmá vzdálenost od letadla ke střeše domu a od letadla ke korunám stromů. Vzdálenost od letadla ke stromům musí být delší o polovinu délky pulsu V podle vztahu 2.25 než vzdálenost od letadla k domu. Popřípadě na obr. 2.14 je vyznačena šikmá vzdálenost mezi letadlem a bodem A. Stejně může být zakreslena šikmá vzdálenost mezi letadlem a bodem B. Rozdíl těchto vzdáleností musí být větší o hodnotu vypočítanou podle následujícího vztahu.

$$V = \frac{c \cdot \tau}{2} \quad [m] \quad (2.25)$$

Délku trvání pulsu vyjadřuje proměnná τ . K rozlišení bodů na povrchu Země dojde, když jejich vzdálenost bude větší než R_r .

$$R_r = \frac{c \cdot \tau}{2 \cdot \cos \theta} \quad [m] \quad (2.26)$$



Obr. 2.14 Příčné prostorové rozlišení

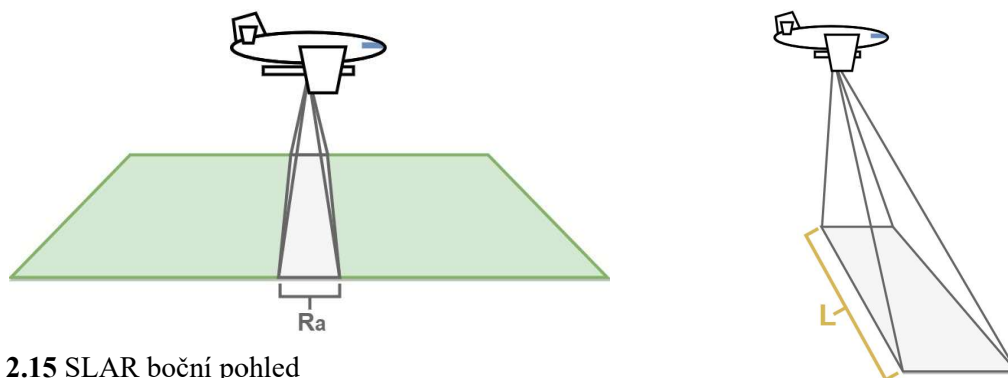
Podélné rozlišení

Boční radar má jiné prostorové rozlišení ve směru letu a kolmo na směr letu. Rozlišení v příčném směru (kolmo na směr letu) je možné vypočítat vztahem 2.26 a závisí na vzdálenosti nosiče od předmětu a délce trvání vyslaného pulsu.

Rozlišení v podélném směru viz obr. 2.15 rovnoběžně s letem nosiče určuje vyzářovací diagram antény. Delší anténa má užší vyzářovací svazek a lepší podélné prostorové rozlišení. To omezuje umístění bočního radaru na družici, pro dobré podélné rozlišení je potřeba dlouhé antény. Podélné rozlišení R_a se vypočítá podle vztahu 2.27.

$$R_a = L \cdot \frac{\lambda}{H} \quad [m] \quad (2.27)$$

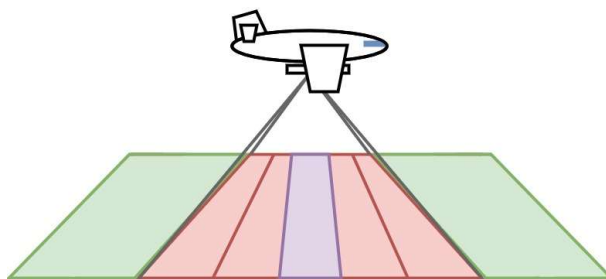
Ve vztahu 2.27 je H délka antény a L je vzdálenost viz obr. 2.15. S větší vzdáleností nosiče od místa pozorování se podélné prostorové rozlišení zhoršuje, například pro vlnovou délku 1 mm, vzdálenost $L = 1$ km a délku antény 10 m je prostorové rozlišení 10 m. Pro délku $L = 2$ km je již prostorové rozlišení 20 m.



Obr. 2.15 SLAR boční pohled

2.7.2 Radar se syntetickou aperturou (SAR)

Problémem bočního radaru jsou velké rozměry antény, z toho důvodu je obtížné využít tento typ snímání na družicovém nosiči. SAR disponuje krátkou anténou, ale umí uměle vytvořit velkou anténu. Má dobré prostorové rozlišení i v případě malé antény, proto se často používá na umělých družicích.



Obr. 2.16 Boční pohled SAR

SAR využívá Dopplerova jevu, odrazy před nebo za nosičem vykazují posun frekvence viz obr. 2.16 červená oblast. Za nosičem dochází ke zmenšování přijaté frekvence a před

nosičem dochází k zvětšování přijaté frekvence podle Dopplerova jevu. Zpracovávají se pouze signály, které mají velmi malý nebo žádný frekvenční posun, tedy signály, které přicházejí kolmo na nosič – na obrázku fialová oblast [1; 2; 11].

2.7.3 Lidar (Light Detection And Ranging)

Lidar je podobný radaru, ale na rozdíl od radaru vyzařuje ve viditelné části spektra. Lidar vysílá velmi krátké laserové pulsy, které mají trvání v řádu nanosekund. U lidarů se využívají nejvíce následující tři varianty.

Laserové dálkoměry

Lidar lze použít k měření vzdálenosti a tvarů objektů. Zařízení vyšle impuls a měří se doba opětovného přijetí odraženého impulsu od povrchu, z této doby se vypočítá vzdálenost objektu od zařízení. Ze známé výšky družice a vzdálenosti objektu od družice se určí výška objektu. Tímto způsobem je možné vytvářet hloubkovou mapu, změří se určitý počet bodů na zemi, mezi body se provede interpolace a získá se tvar zemského povrchu.

Diferenční absorpční lidary

Touto technikou se měří hustota různých plynů. Lidar vyšle dva krátké impulsy, jeden impuls je na vlnové délce absorpce sledovaného plynu a druhý je mimo absorpční pás. Po přijmutí obou paprsků se z jejich rozdílu určí množství obsahu plynu.

Dopplerovské lidary

Dopplerovský lidar využívá Dopplerova jevu pro zjištění rychlosti pohybujících se předmětů. Frekvence odraženého záření se porovná s místním oscilátorem, ze změny frekvence se následně vypočítá rychlost pohybujícího se objektu [6; 20].

3 Družice

Základním prvkem pro dálkové pozorování Země je záznamové zařízení a pohyblivý nosič. Je to nejdražší část celého systému. Na vlastním vybavení a parametrech nosiče závisí níže zmíněné vlastnosti a následné možnosti využití snímků. Nejčastěji používané nosiče mohou být pilotované (vrtulníky, letadla) a nepilotované (bezpilotní letadla, umělé družice).

Mezi výhody letadla patří velký palubní prostor, je zde možné umístit větší množství sledovacích zařízení, na palubě může být také posádka, která přizpůsobuje snímky aktuálním potřebám. Další velkou výhodou je příznivá cena na rozdíl od družicových systémů. Nevýhodou je nestálý pohyb letadla, kolísání výšky, driftový posun vlivem větru. K eliminaci těchto vlivů je nutné instalovat na letadle další měřicí zařízení. Mezi další problémy patří, že letadlo letí níž a zabírá jedním přeletem menší plochu. Pro zvětšení skenované plochy je potřeba zvětšit vychýlení skeneru, velké vychýlení skeneru způsobuje zkreslení na okrajích snímku.

Bezpilotní letadla jsou levná, jednoduchá na ovládání, díky nižší výšce letu mohou nést levnější senzorická vybavení. Na druhé straně neumožňují snímání velkých částí území najednou, jsou vhodná pro rychlé nasazení v místě aktuální potřeby.

Použití družicových systémů přináší některé výhody oproti pilotovaným a bezpilotním letadlům. Družice operují ve větší výšce, jedním záběrem pořídí obrázek rozsáhlého území. Pořízením snímku v jednu chvíli se zajistí stejné podmínky pro sledovanou oblast. Hodnoty z rozlehlého území jsou získány v jeden čas, roční dobu nebo při konstantních světelných podmínkách. Letadlo by stejný snímek pořizovalo daleko delší dobu a nebyly by zajištěny neměnné vlastnosti pořizované scény. Další výhodou je opakovatelnost měření v řádu dnů, letadlem by nebylo možné snímkovat tak velkou plochu se stejným časovým rozlišením jako u družice. Častým přeletem družic nad stejným místem lze vyloučit oblačnost, čím častěji družice přelétne nad danou oblastí, tím větší je pravděpodobnost zachycení území bez mraků. Proti těmto výhodám stojí velké finanční zatížení provozování družicových systémů, nemožnost opravy nebo aktualizace zařízení umístěných na družici [2].

Družicových systémů existuje velké množství. Některé země, organizace nebo firmy provozují vlastní družicové sítě. Důvodů může být mnoho, využití ve vojenské oblasti pro bezpečnost dané země, vědecké účely nebo prodej dat a využití v komerční sféře.

3.1 VLASTNOSTI DRUŽICOVÝCH DAT

V současné době jsou družicové snímky Země nejčastěji dodávány ve formě digitálních dat. Důvodem může být jejich snadné ukládání, rychlé a automatické zpracování bez zásahu člověka. Digitální obraz nenabývá spojitych hodnot, ale je tvořen obrazovými body (pixely). S tím souvisí jedna vlastnost těchto snímků a to skutečné prostorové rozlišení jednotlivých pixelů. Další důležitou charakteristikou je spektrální rozlišení snímku. Spektrální rozlišení je v úzkém vztahu s prostorovým rozlišením, čím širší je frekvenční pásmo, ve kterém je obraz snímán, tím je možné docílit většího prostorového rozlišení. Pokud je obraz pořízen v širokém frekvenčním pásmu, tak na senzor dopadá více elektromagnetického záření. Jednotlivé buňky senzoru mohou být menší, snímají menší plochu a je docíleno většího prostorového rozlišení. Naopak pokud snímání provádíme v úzkém frekvenčním pásmu, máme dobré spektrální rozlišení, ale horší prostorové rozlišení, jednotlivé buňky senzoru musí být z důvodu nedostatku dopadající energie větší.

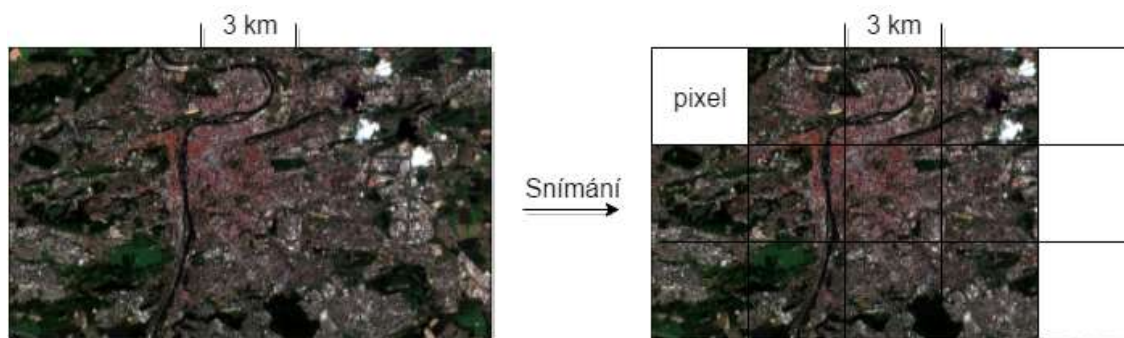
Většina družic k získání co největšího množství informace jedním přeletem snímá stejné území ve více částech frekvenčního spektra, pořizuje takzvané multisppektrální, superspektrální nebo hyperspektrální snímky. Dalšími důležitými vlastnostmi dat získaných dálkovým průzkumem Země je radiometrická a časová rozlišovací schopnost.

Tyto charakteristiky můžeme nalézt u snímků získaných jak pasivním, tak i aktivním snímáním. Snímky pořízené radarem mohou obsahovat informace ještě například o polarizaci, frekvenci nebo fázi vyslaného a přijatého paprsku.

Data pořízená dálkovým průzkumem Země se v těchto parametrech liší v závislosti na účelu použití nebo třeba jestli jsou uživatelům dostupná zdarma, či za poplatek. Někdy může být požadováno, aby snímek zachycoval co možná největší plochu území například pro meteorologické účely nebo naopak pro vojenské využití je potřeba co nejmenší prostorové rozlišení, třeba pro pozorování pohybu na vojenské základně.

3.1.1 Prostorové rozlišení

Digitální obraz je tvořen maticí pixelů. Pokud obraz zachycuje určitou plochu Země, tak každý pixel zaujímá menší část této plochy. Prostorové rozlišení udává délku hrany jednoho pixelu ve skutečnosti, například u družic Sentinel-2 je prostorové rozlišení u nejpřesnějších snímků 10 m. V tomto případě jeden pixel zaujímá plochu 100 m². Menší hodnota znamená větší prostorové rozlišení. Pro různé aplikace existují systémy s různým prostorovým rozlišením, prostorové rozlišení se může pohybovat od desítek centimetrů až po kilometry.



Obr. 3.1 Prostorové rozlišení snímku 3 kilometry

Snímky s nízkým rozlišením

Snímky jsou pořizovány s rozlišením větším než 30 m. Družice pracující s nižším prostorovým rozlišením, obvykle sledují stejné místo častěji například každých 15 minut. Současně bývá většinou pozorováno rozsáhlé území (kontinenty, oceány), snímky se využívají například pro sledování klimatických změn, stavu sněhové a ledové pokrývky, teploty zemského povrchu a oceánů nebo meteorologická měření.

Snímky se středním rozlišením

Jejich prostorové rozlišení je mezi 2 – 30 m. Toto rozlišení se používá pro globální pozorování zemského povrchu například při sledování stavu životního prostředí, odlesňování deštných pralesů či živelných katastrof.

Snímky s vysokým rozlišením

Jedná se o nejpřesnější rozlišení, je menší než 2 m, snímky zobrazují většinou menší části území. Jsou zpřístupněné pro komerční a osobní účely až od posledních let, dříve byly vyhrazeny většinou jen pro vojenské využití. Například satelit QuickBird dosahuje prostorového rozlišení u panchromatického snímku až 60 cm. Družice poskytují svoje data pro tématické nebo topografické mapování, další využití může být například v zemědělství, pro plánování městské výstavby, stavby silnic nebo pro státní správu.

3.1.2 Spektrální rozlišení

Většina družic dálkového průzkumu Země pořizuje obrázky v rozdílných spektrálních pásmech. Toto rozlišení je dáno množstvím spektrálních pásem a jejich šířkou, obvykle se zvětšujícím se počtem snímaných pásem se jejich vlastní šířka zužuje. V závislosti na jejich množství a šířce je můžeme rozdělit do pěti skupin, toto rozdělení je často subjektivní a záleží, pro jaké účely se data používají.

Panchromatické snímky

U tohoto typu snímků je senzor citlivý na dopadající záření ve velkém frekvenčním rozsahu. Většinou pracuje v pásmu od viditelného po blízké infračervené elektromagnetické záření. Všechno toto záření dopadá v jeden okamžik na panchromatický senzor. V důsledku toho mají tyto snímky většinou největší prostorové rozlišení, za cenu ztráty spektrálního rozlišení. Panchromatické snímky se svým vzhledem blíží černobílé fotografii, například u družice Landsat 8 je panchromatický snímek pořizován v pásmu od 0,5 μm do 0,68 μm .

Multispektrální snímky

Snímky jsou pořizovány v několika různých frekvenčních pásmech, příkladem může být družice, která snímá zemský povrch ve třech různých vlnových délkách a to v zelené od 0,5 μm do 0,59 μm , červené od 0,61 μm do 0,68 μm a v blízké infračervené od 0,79 μm do 0,89 μm části spektra. V tomto případě jsou každému pixelu přiřazeny tři hodnoty dopadající záře odpovídající těmto třem pásmům. Jednotlivé multispektrální snímky lze skládat dohromady a vytvářet tak obraz v pravých nebo nepravých barvách.

Superspektrální snímky

V některých případech družice snímají povrch i ve větším počtu frekvenčních pásem, pracují v oblastech od viditelného přes blízké, střední infračervené až po termální infračervené záření. Snímané frekvenční oblasti mají ale velmi malou šířku pásma. Využití může být například k přesnému rozlišení zeleně, kdy různé druhy rostlin mají jinou hodnotu odrazivosti v rozdílných částech elektromagnetického spektra.

Hyperspektrální snímky

Hyperspektrální snímky se skládají ze stovek i více pásem. Pomocí těchto snímků můžeme zjistit přesné spektrální charakteristiky jednotlivých pixelů (objektů) přes velkou šířku pásma.

3.1.3 Používaná frekvenční pásma

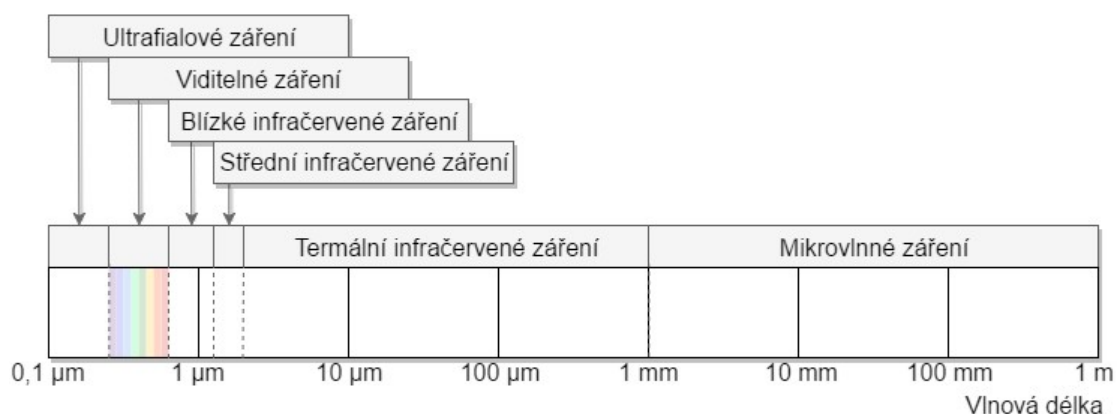
Družicové snímky se mohou skládat z obrázků stejného území pořízeného v mnoha frekvenčních pásmech. Díky tomu lze získat více informací o objektech na zemském povrchu. Používané frekvence nemohou být libovolné. Jedná se o bezkontaktní měření, záznamové zařízení je v určité vzdálenosti od zemského povrchu. Musí se brát v úvahu prostor mezi zemským povrchem a družicí, v tomto případě je to atmosféra. V důsledku toho je odrážené nebo emitované záření v některých částech elektromagnetického spektra tlumené nebo rozptylované atmosférou. Existují určité frekvence, kde není elektromagnetické záření ovlivňováno, tyto místa se nazývají atmosférická okna. V těchto pásmech lze provádět měření,

aniž by došlo k negativní změně měřených údajů. Používané frekvenční rozsahy v dálkovém průzkumu Země můžeme rozdělit do následujících kategorií. Rozdělení není přesně dané a závisí na konkrétním zařízení nebo k jakému účelu se data používají podle [1].

Tab. 3.1 Přehled používaných frekvenčních pásem

Část spektra	Interval vlnových délek
Ultrafialové záření	0,1 – 0,4 μm
Viditelné záření	0,4 – 0,7 μm
Blízké infračervené záření	0,7 – 1,4 μm
Střední infračervené záření	1,4 – 3,0 μm
Termální infračervené záření	3,0 μm – 1 mm
Mikrovlnné záření	1 mm – 1 m

Zdroj: Tabulka převzata z [1, s. 17]



Obr. 3.2 Grafický přehled používaných frekvenčních pásem

Ultrafialové záření

Ultrafialové záření je silně pohlcováno atmosférou a mnoha organismům toto vlnění škodí. I když lze některé minerály v tomto pásmu rozeznat, není moc využíván právě kvůli silné absorpci atmosférou.

Viditelné záření

Používá se většinou pro zobrazení družicového snímku v pravých barvách, tak jak krajinu vnímá lidské oko. Povrch se snímá v zelené, modré a červené části spektra. Snímky se kombinují do jednoho barevného obrázku, který přibližně odpovídá našemu vnímání. Nevýhodou je, že záření ve viditelné části špatně prochází oblačností a mlhou. Modrou část spektra lze použít pro zkoumání vlastnosti vodních ploch. Půdu, minerály ani horniny nelze v této části spektra rozeznat. Záření také není vhodné pro výzkum vegetace, protože jednotlivé druhy rostlin vykazují jen malé odlišnosti v zelené části spektra.

Blízké infračervené záření

Na rozdíl od viditelného záření je toto záření již méně rozptylováno a pohlcováno atmosférou. Pásmo se většinou využívá k studování rostlin, zemědělských plodin nebo třeba v lesnictví. Voda je na těchto snímcích zobrazena černou barvou, má vlastnosti téměř jako absolutně černé těleso.

Střední infračervené záření

V tomto pásmu lze rozlišit některé druhy vegetace, mnoho minerálů zde má svůj absorpční pás, dále se hodí k výzkumu sněhové a ledové pokrývky, také je zde možné zjišťovat zdravotní stav vegetace.

Tepelné záření

V této oblasti již převažuje záření emitované z objektů nad zářením odraženým. Díky tomu je možné sledovat například teplotu oceánů, měst, krajiny, nebo monitorovat třeba lesní požáry.

Mikrovlnné záření

Mikrovlnné záření je možné využívat při pasivním snímání, ale větší uplatnění našlo v aktivních systémech. Důvodem menšího využití při pasivním snímání je, že objekty emitují v této části spektra velmi málo záření. Měření probíhá na velké ploše a je dosaženo malého prostorového rozlišení. Z tohoto důvodu je využíváno spíše aktivními systémy (radary). Mikrovlnné záření je ze všech ostatních záření nejméně ovlivňováno počasím, pouze silným deštěm. Mikrovlnné záření se využívá například v meteorologii nebo při studiu povrchů.

3.1.4 Radiometrická rozlišovací schopnost

Snímací senzor od sebe dokáže rozlišit pouze určité minimální hodnoty dopadajícího elektromagnetického záření, je to počet rozlišitelných úrovní signálu. Po převodu na digitální obraz je to počet stupňů šedi, kterých může obraz nabývat (bitová hloubka). Hodnoty jsou mocniny dvou, obvyklé hodnoty jsou například 11 bitová hloubka (2^{11} , 2048 úrovní šedi) například u družice Landsat 7 anebo 16 bitová hloubka (2^{16} , 65536 úrovní šedi) u radarových dat, družic Sentinel. Čím větší je bitová hloubka, tím lépe lze od sebe rozlišit objekty s podobnými vlastnostmi. Při využívání dat se preferuje větší bitová hloubka, nevýhodou je, narůstající velikost souborů.

3.1.5 Časová rozlišovací schopnost

Časová rozlišovací schopnost je informace o tom, za jak dlouho bude družice snímat opět stejné území. Dráhy družic jsou obvykle konstruovány tak, aby se družice po určité době vrátily opět

na stejné místo. Při zpracování jsou k dispozici snímky stejného území v různém časovém horizontu a je možné studovat například změny v krajině, ubývání, přibývání lesního porostu či vývoj počasí.

3.1.6 Radarová data

U radaru mohou být ovlivňovány i parametry vysílaného signálu. Lze měnit nejen vlnovou délku radarového signálu, ale i polarizaci, která může být lineární, kruhová nebo eliptická. V dálkovém průzkumu Země se nejčastěji využívá lineární a v některých případech kruhová polarizace. Lineární polarizace může být horizontální, vertikální nebo může nabývat obecného úhlu. Někdy má vysílaný paprsek lineární vertikální polarizaci a přijímaný paprsek lineární horizontální polarizaci nebo naopak. Často je vysílaná a přijímaná polarizace značena HH, VV, VH nebo HV. Například VH značí vysílanou vertikální a přijímanou horizontální lineární polarizaci. Při vysílání a přijímání rozdílné polarizace může být třeba zjišťována drsnost povrchů [1; 6; 10; 12; 13].

3.1.7 Formát uložených dat

Protože obrazová družicová data mají obvykle velkou velikost, je nutné je určitým způsobem komprimovat. Nekomprimovaná data mohou nabývat velikosti i jednotek TB. Kompresi snižuje nároky na paměť a výpočetní výkon, umožňuje rychlejší zpracování dat a z toho plynou nižší finanční náklady na práci s těmito daty. Kompresi může být ztrátová nebo bezztrátová. Bezeztrátová komprese nedosahuje tak velkého kompresního poměru jako ztrátová komprese, a hodí se tam, kde chceme pracovat s původními snímky. Když potřebujeme data více komprimovat, musíme použít ztrátovou kompresi. Nevýhodou je, že ztrátová komprese může způsobovat kompresní artefakty a měnit hodnoty pixelů, po ztrátové kompresi se již nepracuje s původními daty.

Formátů pro ukládání družicových snímků je velké množství, neexistuje žádná norma, která by předepisovala, jak mají být družicové snímky ukládány. K družicovým snímkům jsou často dodávány další údaje jako skutečná poloha snímku na Zemi, čas pořízení snímku, prostorové, spektrální rozlišení, dráha družice. Některé formáty umožňují vložit tuto informaci přímo do obrazového souboru například GeoTIFF. Snímky z družic Landsat a Sentinel jsou ukládány v následujících formátech.

Tag Image File Format (TIFF)

TIFF je bezztrátový formát dat, podporuje 1 – 24 bitovou hloubku. Umožňuje velké množství bezztrátových kompresních algoritmů (LZW, RLE, ZIP), využívá se, když mají snímky malé

prostorové rozlišení a tedy menší velikost nebo by je ztrátová komprese ještě více degradovala. U družicových dat se k nim musí přidat doplňkový soubor s informacemi o poloze satelitního snímku na zemském povrchu.

GeoTIFF

GeoTIFF vychází z formátu TIFF, ale umožňuje vložit do hlavičky ještě doplňkové informace o snímku.

JPEG 2000 (JP2000)

Tento standard byl vyvinut skupinou JPG (Joint Photographic Expert Group). Používá ke kompresi vlnkovou transformaci. Nabízí bitovou hloubku až 48 bitů, stejně jako u formátu TIFF je potřeba k snímku vložit externí soubor se zeměpisnými informacemi. Podporuje jak ztrátovou tak i bezztrátovou kompresi [21].

3.2 LANDSAT

Družicové systémy Landsat a Sentinel, které zde popíši, poskytují své snímky volně na internetu.

3.2.1 Základní informace

Program Landsat provozuje NASA a U.S. Geological Survey (USGS). Je to nejdéle trvající projekt dálkového pozorování Země. První družice Landsat 1 byla vynesena na oběžnou dráhu už v roce 1972, zatím poslední družice Landsat 8 byla vypuštěna do vesmíru v roce 2013. Družice Landsat snímají zemský povrch již přes 40 let. Snímky představují cenný zdroj informací o časovém vývoji předmětů na Zemi. Je možné sledovat odlesňování deštných pralesů, klimatické změny, přesun obyvatel do měst, rozrůstání městské zástavby. Velký význam mají tyto data v rozvojových zemích, kde jsou informace tohoto druhu špatně dostupné nebo nemusí existovat vůbec.

3.2.2 Historie

V roce 1965 William Thomas Pecora, v té době ředitel USGS, představil svou myšlenku o vytvoření satelitního systému, který by sbíral informace o zemském povrchu. V 50. a 60. letech začal být o téma vesmírného pozorování velký zájem. V té době probíhaly vesmírné programy Mercuri (1958-1963) a Gemini (1962-1966), které měly za úkol dopravit člověka na oběžnou dráhu, zajistit jeho bezpečné přistání zpátky na Zem nebo například ověřit, zda je možný dlouhodobý pobyt člověka ve stavu beztíže. V průběhu misí byly také pořízeny fotografie

zemského povrchu z oběžné dráhy. Jeden ze snímků zaujal tehdejšího ministra vnitra Stewarta Udalla. Na obrázku bylo zřetelně vidět znečištění státu Arizona v oblasti Four Cornes, kde jsou velké elektrárny. Všechny tyto poznatky zvýšily zájem vědecké i široké veřejnosti o vesmírný výzkum.

Pořízené snímky se zdály být užitečné, v návaznosti na tyto mise přišel nápad, který představoval vytvoření systému monitorující pouze povrch Země. Přestože už od roku 1960 probíhalo satelitní monitorování zemské atmosféry, nebylo do té doby rozhodnuto, zda je nezbytné i satelitní pozorování povrchu Země.

Rozhodnutí o schválení financování projektu Landsat 1 se setkala s velkým odporem, důvodem byla jeho velká finanční náročnost. Navrhovaným řešením bylo využití výškového letadla, s odůvodněním, že je dostačující a finančně přístupnější. Dále byla obava, že by civilní družice mohly ohrozit utajení vojenských aktivit a také vyvstala otázka fotografování cizích zemí bez povolení.

V roce 1965 začala NASA pro dálkový průzkum Země využívat letadla. I přes všechny problémy vydal 21. září 1966 ministr vnitra Stewart Udall spolu s NASA a ministerstvem zemědělství prohlášení o zahájení ambiciózního projektu za účelem sestrojení první civilní družice. Nicméně rozpočtová omezení a neshody mezi vládními orgány tento proces opět zastavily. Nakonec v roce 1970 dostala NASA zelenou a dala se do výstavby satelitu. Během pouhých dvou let byl satelit Landsat 1 vypuštěn na oběžnou dráhu, což ohlašovalo novou éru dálkového průzkumu Země z vesmíru [15].

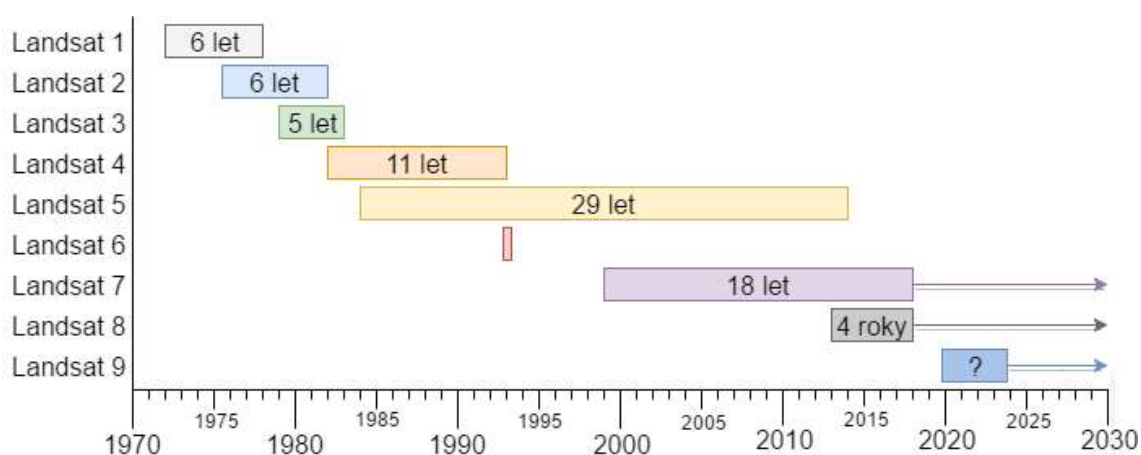
3.2.3 Družice

V tabulce 3.2 jsou uvedeny družice tohoto programu, začátek a konec jejich provozu a používané snímací zařízení. Poslední vypuštěnou družicí v roce 2013 je Landsat 8. Začátek provozu družice Landsat 9 je zatím plánován na rok 2020. Družice číslo 6 havarovala při startu, z tohoto důvodu byla prodloužena činnost družice Landsat 5, která sloužila přes 28 let. Je to nejdéle operující družice a byla zapsána do Guinnessovy knihy rekordů.

Tab. 3.2 Historický přehled misí

Název družice	Datum spuštění	Datum ukončení	Senzory
Landsat 1	23. červen 1972	6. leden, 1978	RVB, MSS
Landsat 2	22. leden 1975	25. únor, 1982	RVB, MSS
Landsat 3	5. březen 1978	31. březen 1983	RVB, MSS
Landsat 4	16. červenec 1982	14. prosinec 1993	MSS, TM
Landsat 5	1. březen 1984	5. červen 2013	MSS, TM
Landsat 6	5. října 1993	5. října 1993	ETM
Landsat 7	15. duben 1999	stále v provozu	ETM+
Landsat 8	11. únor 2013	stále v provozu	OLI,TIRS
Landsat 9	prosinec 2020		OLI+,TIRS+

Zdroj: <https://landsat.usgs.gov/landsat-missions-timeline>


Obr. 3.3 Zobrazení délky trvání jednotlivých misí

3.2.4 Použitá zařízení

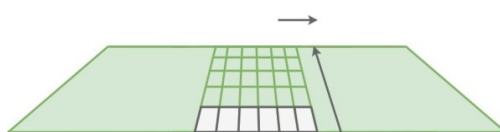
Return Beam Vidicon (RBV)

Zařízení bylo umístěno na družicích Landsat 1 – 2, družice byly vybaveny třemi televizními kamerami. Každá kamera natáčela zemský povrch v jiné části spektra (modro-zeleném, žluto-červeném, blízkém infračerveném), výsledný snímek je složen kombinací z těchto tří kamer. Kamery byly totožné vyjma barevných filtrů, které zajišťovaly rozdílné spektrální rozlišení. Snímané území mělo velikost 148×148 km s 80 m rozlišením.

RBV na družici Landsat 3 bylo mírně modifikováno, místo tří kamer zde byly umístěny kamery dvě, každá snímala povrch v panchromatickém režimu. Také zabíraly jinou část území, sledovaly území o velikosti 98×98 km se společnou 13 km částí. Výsledný záběr měl po spojení velikost 183×98 km. Úpravami se dosáhlo na tu dobu skvělého prostorového rozlišení 25 m.

Multispectral Scanner (MSS)

Multispectral Scanner bylo jedno z prvních specializovaných zařízení pro dálkový průzkum Země, které pořizovalo multispektrální snímky. MSS neslo na své palubě prvních pět družic Landsat. Skener obsahuje rotující zrcadlo, je to mechanický skener, snímá povrch kolmo na směr letu. V jednu chvíli je snímáno šest řádek viz obr. 3.4, MSS obsahuje pro jeden řádek čtyři detektory, které snímají čtyři spektrální pásma, celkem zde bylo umístěno dvacet čtyři detektorů (šest řádek po čtyřech detektorech). Landsat 3 ještě navíc pořizoval snímky v termálním pásmu a na družicích Landsat 4 – 5 bylo toto zařízení umístěno z důvodu zachování kontinuity mapování.



Obr. 3.4 Snímání šesti řádek současně

Tab. 3.3 Multispectral Scanner, přehled pásem

Pásma	Vlnová délka [μm]	Rozlišení [m]
Pásmo 1 – Viditelné zelené	0,5 – 0,6	60*
Pásmo 2 – Viditelné červené	0,6 – 0,7	60*
Pásmo 3 – Blízké infračervené (NIR)	0,7 – 0,8	60*
Pásmo 4 – Blízké infračervené (NIR)	0,8 – 1,1	60*

Velikost snímaného povrchu byla 170×180 km, prostorové rozlišení je 79×58 m převzorkované na 60 m [23].

Landsat Thematic Mapper (TM)

Tento skener nahradil na družicích Landsat 4 – 5 zařízení RVB, pořizuje čtyři snímky ve viditelném spektru a tři v infračervené části spektra. Jde opět o mechanický skener, který dosahuje dvakrát lepšího prostorového rozlišení než MSS. Snímané území má velikost 170×183 km, je zde také umístěný senzor pracující v termální oblasti s rozlišením 120 m (upravené na 30 m). Tento senzor navazuje na zkušební provoz tepelného senzoru na Landsat 3.

Tab. 3.4 Landsat Thematic Mapper, přehled pásem

Pásma	Vlnová délka [μm]	Rozlišení [m]
Pásmo 1 – Viditelné modré	0,45 – 0,52	30
Pásmo 2 – Viditelné zelené	0,52 – 0,60	30
Pásmo 3 – Viditelné červené	0,63 – 0,69	30
Pásmo 4 – Blízké infračervené (NIR)	0,76 – 0,90	30
Pásmo 5 – Střední infračervené (SWIR) 1	1,55 – 1,75	30
Pásmo 6 – Termální infračervené	10,40 – 12,50	120*(30)
Pásmo 7 – Střední infračervené (SWIR) 2	2,08 – 2,35	30

Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM)

Zařízení bylo nesené družicí Landsat 6, která havarovala při startu, a tudíž nedošlo k ověření jeho skutečné funkčnosti.

Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)

Všechna předchozí zařízení již nejsou v provozu, v současné době jsou funkční pouze družice Landsat 7 a Landsat 8. ETM+ je umístěno na Landsat 7, zařízení využívá mechanický skener, poskytuje stejná data jako TM a přidává k nim panchromatický snímek s prostorovým rozlišením 15 m. Termální infračervené pásmo je snímáno s rozlišením 60 m, koncovým uživatelům je dodávané převzorkované na 30 m.

Tab. 3.5 Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus, přehled pásem

Pásma	Vlnová délka [μm]	Rozlišení [m]
Pásmo 1 – Viditelné modré	0,45 – 0,52	30
Pásmo 2 – Viditelné zelené	0,52 – 0,60	30
Pásmo 3 – Viditelné červené	0,63 – 0,69	30
Pásmo 4 – Blízké infračervené (NIR)	0,77 – 0,90	30
Pásmo 5 – Střední infračervené (SWIR) 1	1,55 – 1,75	30
Pásmo 6 – Termální infračervené	10,40 – 12,50	60*(30)
Pásmo 7 – Střední infračervené (SWIR) 2	2,09 – 2,35	30
Pásmo 8 – Panchromatické	0,52 – 0,90	15

Bohužel v roce 2003 došlo k poškození výkyvného zrcátka (Scan Line Corrector, SLC). Z toho důvodu došlo k zúžení snímané scény, neporušeně se snímá pruh země úzký pouze 22 km. Celá velikost scény je 170×183 km a nepoškozená je pouze 1/8 obrazu, což značně limituje využití dat. Družice se nad stejným územím ukáže po 16 dnech.

Operational Land Imager (OLI) a Thermal Infrared Sensor (TIRS)

OLI již využívá elektronický skener s tisíci detektory v jedné řádce, oproti ETM+ byla přidána pásma 1 a 9. Pásmo 1 může sloužit ke studiu povrchových vod, na delších vlnových délkách voda ve velké míře dopadající záření pohlcuje a rozptyluje a je představována převážně černou barvou. V pásmu 1 je možné studovat například koncentraci chlorofylu a naplavené sedimenty v pobřežních vodách, v této části spektra lze také sledovat částičky prachu a kouře

Pásmo 9 slouží k práci s oblačností, zemský povrch je na těchto vlnových délkách velmi tmavý a mraky naopak světlé.

Celková velikost snímaného území a časová rozlišovací schopnost je stejná jako u družice Landsat 7. Termální pásma jsou snímána se 100 m rozlišením a přepočítané na 30 m rozlišení [14; 15; 22].

Tab. 3.6 Operational Land Imager a Thermal Infrared Sensor, přehled pásem

Pásma	Vlnová délka [μm]	Rozlišení [m]
Pásmo 1 – Ultra Blue (coastal/aerosol)	0,43 – 0,45	30
Pásmo 2 – Viditelné modré	0,45 – 0,51	30
Pásmo 3 – Viditelné zelené	0,53 – 0,59	30
Pásmo 4 – Viditelné červené	0,64 – 0,67	30
Pásmo 5 – Blízké infračervené (NIR)	0,85 – 0,88	30
Pásmo 6 – Střední infračervené (SWIR) 1	1,57 – 1,65	30
Pásmo 7 – Střední infračervené (SWIR) 2	2,11 – 2,29	30
Pásmo 8 – Panchromatické	0,50 – 0,68	15
Pásmo 9 – Cirrus	1,36 – 1,38	30
Pásmo 10 – Termální infračervené (TIRS) 1	10,60 – 11,19	100 * (30)
Pásmo 11 – Termální infračervené (TIRS) 2	11,50 – 12,51	100 * (30)

Zdroj: <https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>

3.3 PROJEKT COPERNICUS

3.3.1 Základní informace

Copernicus je evropský program dálkového pozorování Země, spadá pod dohled Evropské komise. Záštitu zajišťuje Evropská unie, o vesmírnou část programu, jeho provoz a vývoj se stará Evropská vesmírná agentura (European Space Agency, ESA).

Stejně jako ostatní družicové systémy je i tento tvořen ze tří částí, z vesmírného a pozemního segmentu a poskytovaných služeb. Vesmírná část je tvořena družicemi obíhajícími

okolo Země, družic je plánováno šest řad a nazývají se Sentinel. Počítá se, že některé budou součástí jiných kosmických programů. Pozemní segment provádí příjem a zpracování informací z družic a probíhá v různých zemích EU. Poskytované služby jsou rozděleny do šesti oblastí: mořské prostředí, atmosféra, bezpečnost, krizové řízení a změna klimatu. V současné době je v provozu pět družic Sentinel: Sentinel-1A, Sentinel-1B, Sentinel-2A, Sentinel-2B a Sentinel-3A.

Projekt Copernicus má za úkol pomáhat politikům a jiným členům státní správy při správě území Evropské unie nebo například při řešení přírodních katastrof či humanitárních problémů. Dále má sloužit výzkumným a akademickým pracovníkům, soukromým firmám nebo široké veřejnosti pro výzkum nebo vlastní podnikatelské plány.

3.3.2 Historie

Počátky evropského vesmírného programu GMES (Global Monitoring for Environment and Security), později přejmenovaného na COPERNICUS spadají do roku 1998. V květnu 1998 se v italském Bavenu sešli zástupci institucí pracujících na vesmírném výzkumu a vytvořili tzv. Bavenský manifest. Tento manifest vyzýval k vytvoření evropského programu pro družicové pozorování Země za účelem sledování životního prostředí. Na summitu Evropské Rady v červnu 2001 v Göteborgu byl tento plán posvěcen na politické úrovni. V roce 2001 došlo k vytvoření partnerství mezi členskými státy Evropské unie, vesmírnou agenturou a představiteli průmyslu. V rámci Evropské unie byl zřízen v roce 2006 nový úřad GMES se sídlem v Bruselu, úřad má za úkol koordinovat aktivity GMES uvnitř Evropské komise a dále pak s ostatními partnery projektu. V roce 2008 se vymezily základní služby: monitorování mořského prostředí a území a krizové řízení. Tyto služby jsou nazývány jako tzv. prioritní služby (fast track services). Dále byly stanoveny pilotní služby, mezi tyto služby byly zařazeny: bezpečnost, atmosféra a změna klimatu. GMES byl v květnu 2007 začleněn vedle navigačního systému Galileo jako hlavní program evropské vesmírné politiky, který umožní zahájit studium naší Země do hloubky.

V počáteční fázi, před zřízením vlastního vesmírného segmentu, bylo využíváno dat z jiných vesmírných misí ESA nebo EUMETSAT. K zajištění dlouhodobé udržitelnosti tohoto programu se rozhodlo, že GMES si bude muset zřídit svůj vlastní kosmický segment skládající se z několika satelitů s různými druhy pozorovacích zařízení. Projekt se má stát součástí systému globálního pozorování Země (Global Earth Observation System of Systems, GEOSS), pro který bude poskytovat datové produkty a také bude mít přístup k jejich datovým produktům. Dne 11. prosince 2012 Evropská komise přejmenovala GMES na Copernicus, jméno bylo zvoleno podle slavného evropského astronoma Mikuláše Koperníka. Nařízením vydaným v roce

2014 bude pro evropský projekt Copernicus vyhrazeno mezi lety 2014 a 2020 4,2 miliardy eur. V prosinci 2013, po několika měsících jednání, vstoupila v platnost smlouva, která zajišťuje:

- Otevřený přístup k datům z družic pro kohokoli, kdo by je chtěl používat
- Volnou datovou licenci

Omezení je možné pouze vzhledem k technickým nebo bezpečnostním rizikům

První družice s názvem Sentinel-1A byla úspěšně vyslána na oběžnou dráhu kolem země 3. dubna 2014 z vesmírného centra ve Francouzské Guyaně.

3.3.3 Družice

Poskytované služby jsou z velké části založeny na získávání údajů ze snímků, které pořizují jednotlivé družice. Používané satelity můžeme rozdělit do dvou skupin, první část tvoří družice z řady Sentinel, to jsou vlastní družice programu, druhá část je tvořena přispěvatelskými misemi například z ESA, EUMETSAT, členských států EU nebo jiných států, které zpřístupňují svoje data pro program Copernicus. Tyto informace se budou používat i po dokončení vesmírné části, protože jsou pro projekt zásadní.

Vlastní vesmírný segment programu má tvořit šest řad družic Sentinel, první tři řady a šestá řada jsou nebo budou tvořeny dvěma družicemi označovanými A a B, následně je doplní po roce 2020 družice C a D, které je postupně nahradí. První tři řady mají tvořit základ pro budoucí služby, na které budou postupně přidávány doplňkové informace.

Sentinel-1

Mise se skládá ze dvou satelitů Sentinel-1A a Sentinel-1B, jejich činnost byla zahájena 3. dubna 2014 a 25. dubna 2016. Na oběžnou dráhu je vynesla raketa Soyuz z evropského kosmodromu ve Francouzské Guyaně. Družice na své palubě nesou radar se syntetickou aperturou, který vysílá polarizaci HH, VV, VH a HV. Jeden satelit má dobu oběhu Země 12 dní, časová rozlišovací schopnost celé konstelace je 6 dní.

Sentinel-2

Sentinel-2A byl uveden do provozu 23. června 2015 a Sentinel-2B byl vyslán na oběžnou dráhu 7. března 2017. Časová rozlišovací schopnost po vypuštění druhé družice je 5 dní. Povrch je snímán elektronickým skenerem ve dvanácti pásmech od 443 nm do 2190 nm. V současné době poskytují družice volně dostupné snímky s největší prostorovým rozlišením, rozlišení v optické části spektra dosahuje 10 m. Velikost snímaného území je 100×100 km.

Tab. 3.7 Sentinel-2, přehled pásem

Pásma	Vlnová délka [μm]	Rozlišení [m]
Pásmo 1 – Ultra Blue (Coastal/aerosol)	0,43 – 0,45	60
Pásmo 2 – Modré viditelné	0,46 – 0,52	10
Pásmo 3 – Zelené viditelné	0,54 – 0,58	10
Pásmo 4 – Červené viditelné	0,65 – 0,68	;10
Pásmo 5 – Vegetation Red Edge	0,70 – 0,71	20
Pásmo 6 – Vegetation Red Edge	0,73 – 0,75	20
Pásmo 7 – Vegetation Red Edge	0,77 – 0,79	20
Pásmo 8 – Blízké infračervené (NIR)	0,78 – 0,90	10
Pásmo 8b – Vegetation Red Edge	0,85 – 0,87	20
Pásmo 9 – Water vapour	0,94 – 0,95	60
Pásmo 10 – Cirrus	1,38 – 1,49	60
Pásmo 11 – Střední infračervené (SWIR) 1	1,57 - 1,66	20
Pásmo 12 – Střední infračervené (SWIR) 2	2,10 – 2,28	20

Zdroj: https://earth.esa.int/documents/247904/349490/S2_SP-1322_2.pdf/8ca8d869-1759-4acb-9a53-a90d842bb0b9

Sentinel-3

Sentinel-3 bude pořizovat multispektrální a radarová data středního rozlišení, dále ponese zařízení, které umožní monitorování teploty zemského povrchu a hladiny moří. Provoz družice Sentinel-3A byl zahájen 16. února 2016, vypuštění Sentinel-3B je plánováno v roce 2017.

Sentinel-4

Mise Sentinel-4 by měla sloužit zejména k sledování plynů O_3 , NO_3 , SO_2 , HCHO a aerosolů. Z finančních důvodů bude hlavní senzor UVN (Ultra-violet, Visible and Near-Infrared) umístěn na družici MTG-S (Meteosat Third Generation). Družice bude na geostacionární oběžné dráze, spuštění je plánované na rok 2019.

Sentinel-5

Mise Sentinel-5 je plánována také k monitorování atmosféry a jako doplňková k misi Sentinel-4. Předpokládáné spuštění je v roce 2020, dobu před spuštěním by měla překlenout mise Sentinel-5 Precursor.

Sentinel-6

Mise Sentinel-6 bude opět tvořena dvěma družicemi, tyto družice ponесou radarový výškoměr pro měření výšky hladiny moří, a to především pro oceánografii a pro studium klimatu. Jejich plánovaný operativní čas je mezi lety 2020 a 2030 [16; 17; 18].

3.4 FÚZE RŮZNÝCH TYPŮ DAT

V mnoha případech je velice užitečné pro práci využívat více typů dat. Jednou z možností je kombinace satelitních dat z různých zdrojů například od výše zmíněných družic Landsat a Sentinel. Důvodem může být třeba počasí, kdy se oba dva zdroje mohou doplňovat a získáme tím větší šanci pozorování území nezakrytého mraky. Nevýhodou je, že prostorové a spektrální rozlišení různých satelitů není stejné. Je nutné znát nebo si vytvořit přepočítání mezi pásmy různých družic, například ze snímků stejného území pořízeného různými družicemi.

Další cenný zdroj informací mohou nabídnout různé mapové podklady. Na portálu¹ je přehled volně dostupných zdrojů dat, jedná se konkrétně o stránku². Je zde i přehled dalších zdrojů dat, například výškových modelů území, zdrojů lidarových dat a také volně dostupných zdrojů satelitních dat. Značnou nevýhodou je, že některá data jsou dostupná pouze pro určité regiony, nejčastěji pro Severní Ameriku.

Klasické mapy lze volně stáhnout například ze stránek³ případně ze stránek⁴. Pro některá evropská a i velká česká města je možné najít mapu využití krajiny na stránkách⁵.

Také město Praha nabízí značný zdroj dat⁶, je zde barevná mapa až s 10 cm rozlišením, výškový model města nebo například hranice záplavových oblastí.

Velkým problémem je, že neexistuje žádný jednotný portál, který by nabízel tyto data souhrnně na jednom místě, je nutné si vytvořit vlastní databázi. Tyto doplňkové informace mohou mít obecně rastrovou nebo vektorovou podobu. Protože satelitní snímky zaujímají určitou konkrétní polohu na Zemi, je nutné mít informace o umístění i doplňkových dat. Zde je podle mého názoru velký problém při kombinaci satelitních dat s jinými zdroji, neboť neexistuje žádný společný portál, není ani jednotný způsob formátu ukládání dat a přidávaných doplňkových informací. Při práci s rastrovými daty z jiných zdrojů je nutné přepočítat data do jednotného geografického souřadnicového systému. U rastrových dat se musí využívat data buď v jednotném souřadnicovém systému, nebo data, se kterými jsou dodávány doplňkové informace, které umožňují přepočítání do stejných souřadnic. Využití vektorových dat zase vyžaduje použití programu, který podporuje vektorová a rastrová data, a která v Matlabu, bez zakoupení toolboxu s názvem Mapping Toolbox Geographic Data Structures, není možná zpracovat.

¹ <http://gisgeography.com>

² <http://gisgeography.com/best-free-gis-data-sources-raster-vector>

³ <http://www.openstreetmap.org>

⁴ <http://extract.bbbike.org>

⁵ <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/urban-atlas>

⁶ <http://www.geoportalpraha.cz/cs/opendata>

I když si myslím, že tato data nabízejí velmi užitečný zdroj informací. Je velice obtížné s nimi pracovat, zvláště s využitím pro město, například při využití mapy a s použitím vlastních vlíčovacích bodů se satelitním snímkem. I malé nepřesnosti pouze několika pixelů mohou způsobit, že například ulice na mapě nesouhlasí s ulicí na satelitním snímku. Z tohoto důvodu jsem v práci pracoval pouze s daty Sentinel a Landsat, která bylo možné zpracovat v Sentinel toolboxu ze stránek⁷.

Tento program je primárně určen pro satelitní snímky programu Copernicus, ale je v něm možné otevřít i jiná satelitní data. Umožňuje provádět jednoduché analýzy, výpočet indexů nebo klasifikaci dat. U radarových dat umožňuje provést kalibraci, korekci terénu nebo koregistraci s neradarovými snímky. Velice užitečné je, že také dovoluje převést zadané souřadnice na pozici pixelů. Program toto umožňuje pouze s obrázky, se kterými jsou dodávaná data o poloze ve správném formátu.

Další informace nabízejí měřicí meteorologické stanice, data o teplotě pro Českou republiku je možno najít například na stránkách⁸, o počtu prachových částic na stránkách⁹ nebo historická data o počasí například na stránkách¹⁰. Ve vlastní práci využívám informace o počtu prachových částic nebo historické informace o teplotě a množství srážek. V této části odpadá složité georeferencování dat. Na druhou stranu je obtížné s těmito daty pokrýt velká území. Data se musejí většinou pro jednotlivé časové úseky přepisovat ručně, proces je velice zdlouhavý a náchylný k chybám.

⁷ <http://step.esa.int/main/download>

⁸ <http://www.in-pocasi.cz>

⁹ http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab_roc/2016_enh/pollution_overview/overview_PM10_CZ.html

¹⁰ <http://portal.chmi.cz>

4 *Pan-sharpening*

Snímky získané dálkovým průzkumem Země se liší jak v prostorovém rozlišení, tak v šířce snímaného frekvenčního pásma. Pro využívání družicových snímků k sledování městských aglomerací je většinou nutné mít data s co největším prostorovým rozlišením.

Máme obraz, který má dobré prostorové rozlišení a špatné spektrální rozlišení, druhý snímek má naopak lepší spektrální rozlišení a horší prostorové rozlišení. Snahou je sloučit dohromady obrázek s dobrým prostorovým rozlišením, ve většině případů panchromatický snímek, se snímkem multispektrálním, který má naopak dobré rozlišení spektrální. Ideální výsledný snímek bude mít výhodu užšího snímaného frekvenčního pásma (je možné od sebe odlišit objekty s podobnými spektrálními charakteristikami) a zároveň dobré prostorové rozlišení.

Pan-sharpening je technika, pomocí níž lze spojit snímek s dobrým prostorovým rozlišením a snímek s dobrým spektrálním rozlišením a ve výsledku získat jak dobré prostorové, tak i spektrální rozlišení. Existuje velké množství metod, které dovolují snímky sloučit a získat snímek s výhodnějšími vlastnostmi.

Používané metody lze rozdělit do skupin podle společných charakteristik. Rozdělení se liší podle potřeb různých autorů, takto jsou rozděleny metody podle článku [33].

První skupinu tvoří metody, kdy je multispektrální snímek lineárně transformován do nového vyjádření, a jedna z jeho částí je nahrazena panchromatickým snímkem. Do této skupiny patří například metoda IHS nebo PCA. Další skupinu tvoří metody, kdy nový snímek vznikne lineární kombinací multispektrálních snímků a panchromatického snímku, hlavním zástupcem může být například Brovey transform. Třetí skupinou jsou metody, kdy se z panchromatického snímku filtrací extrahují informace o detailech, které jsou vloženy do multispektrálního snímku, představitelem je metoda HPFA. Dále pak metody pracující se statistikou obrazu například Bayesian fusion. Poslední skupinu tvoří metody, založené na multirozkladu (multiresolution analysis) například Laplacian pyramid, Wavelet-based image fusion nebo Contourlet transform-based pan-sharpening. Také se mohou různé metody kombinovat dohromady například Wavelet-based image fusion a metoda IHS [33].

V následující části bych chtěl některé metody, které se v různých článcích objevují nejvíce, popsat trochu podrobněji

4.1 VYBRANÉ METODY

V dalším textu se snažím zachovat jednotné značení. Panchromatický snímek je značen P , multispektrální obraz je značený m_k , index k značí spektrální pásmo. Pokud budou vstupní data obsahovat čtyři multispektrální a jeden panchromatický snímek a multispektrální snímky budou pořízené třeba v červené, modré, zelené a infračervené části spektra bude jim odpovídat značení m_1, m_2, m_3, m_4 a P pro panchromatický snímek. Obecně mají multispektrální a panchromatický snímek jiné rozměry v závislosti na prostorovém rozlišení. Pro další zpracování je většinou nutné zvětšit, převzorkovat multispektrální snímek na velikost panchromatického snímku. Toto je v textu vyjádřeno $M_k = \text{upsampling}(m_k)$, což značí převzorkovaný multispektrální snímek. Po této operaci mají M_k a P stejné rozměry $I \times J$. Pixel o souřadnicích i a j k -tého snímaného spektrálního pásma je pojmenovaný $M_k(i, j)$. Fúzovaný snímek je označený F , popřípadě F s indexem F_{index} .

Použité označení:

P panchromatický snímek

m_k multispektrální snímek s původním rozlišením k -té pásmo

M_k převzorkovaný multispektrální snímek na velikost panchromatického snímku

F_{index} výsledný fúzovaný snímek

4.1.1 Průměrování

Asi nejjednodušší je pouhé zprůměrování panchromatického a multispektrálního snímku.

$$M_k = \text{upsampling}(m_k) \quad (4.1)$$

Vypočítá se průměr hodnot pixelů M_k a P snímku, který tvoří pixel F_k snímku.

$$F_k(i, j) = \frac{M_k(i, j) + P(i, j)}{2} \quad (4.2)$$

4.1.2 IHS fusion

Základem této metody je převod multispektrálního snímku do barevného prostoru IHS. Multispektrální obraz se roztáhne na stejnou velikost jako panchromatický snímek, poté se provede transformace $RGB \rightarrow IHS$. Následně se jasová komponenta nahradí panchromatickým snímekem a obraz se transformuje zpět do RGB.

$$M_k = \text{upsampling}(m_k) \quad (4.3)$$

Vstupem je RGB snímek, nejprve se musí tři multispektrální snímky složit do jednoho RGB obrázku. Dále se obraz transformuje do barevného prostoru IHS následující transformační maticí.

$$\begin{bmatrix} I_M \\ v1_M \\ v2_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ -\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 2 \cdot \sqrt{2} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Složka I (Insensity) zde značená I_M je jasová, H (Hue) je tón a S (Saturation) představuje sytost.

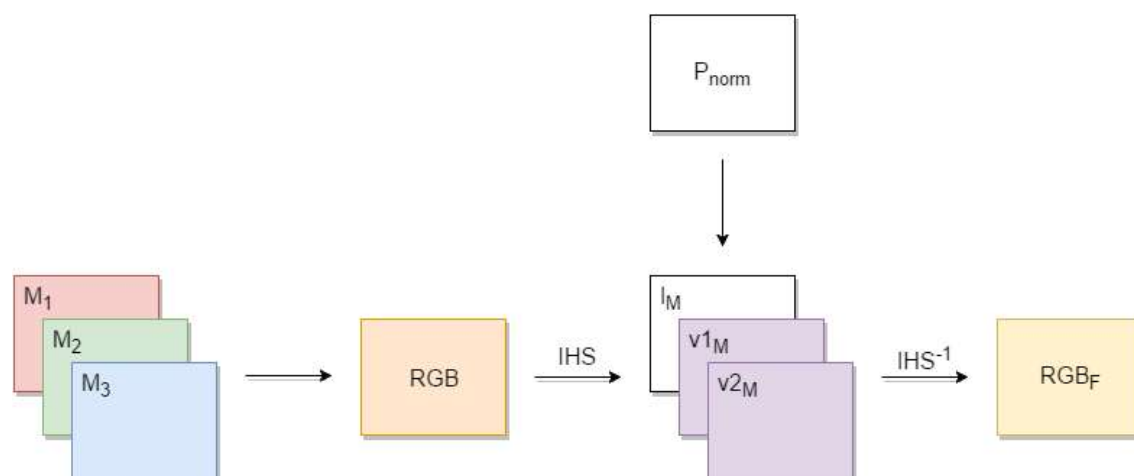
Složky H a S můžeme vypočítat podle vztahu $H = \tan^{-1}\left(\frac{v2_M}{v1_M}\right)$ a $S = \sqrt{v1_M^2 + v2_M^2}$. Tento krok není nutný, protože přepočítané složky H a S nejsou potřeba. Panchromatický snímek je normován P_{norm} na stejnou střední hodnotu a rozptyl jakou má jasová komponenta I_M .

$$P_{norm} = \frac{\sigma_M}{\sigma_P} \cdot (P - \mu(P) + \mu(I_M)) \quad (4.5)$$

Jasová komponenta se nahradí normovaným panchromatickým snímkem a závěrem se provede zpětná $IHS \rightarrow RGB$ transformace.

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{norm} \\ v1_m \\ v2_m \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Transformací $RGB \rightarrow IHS$ existuje vícero druhů. Na volbě transformační matice závisí výsledné barevné zkreslení [8; 34].



Obr. 4.1 IHS fusion

4.1.3 Brovey transform (BT)

BT se jmenuje po svém autorovi Bobu Broveyovi, výsledný snímek vznikne lineární kombinací multispektrálních snímků a panchromatického snímku. Metoda byla vymyšlena pro produkci RGB obrázků a pro BT se musí využít tři pásma.

$$M_k = \text{upsampling}(m_k) \quad (4.7)$$

Pixel $F_k(i, j)$ vznikne násobením pixelu snímku $M_k(i, j)$ a $P_k(i, j)$, dělený sumou pixelů použitých tří pásem. Koeficient N slouží k barevnému normování a rovná se hodnotě $N = 3$.

$$F_k(i, j) = \frac{N \cdot M_k(i, j) \cdot P(i, j)}{\sum_k M_k(i, j)} \quad (4.8)$$

Pro RGB snímek je možné vztah zapsat takto, kde jednotlivé vrstvy RGB snímku jsou tvořeny požadovanými spektrálními pásmy [36].

$$F_R(i, j) = \frac{3 \cdot R(i, j) \cdot P(i, j)}{R(i, j) + G(i, j) + B(i, j)}, F_G(i, j) = \frac{3 \cdot G(i, j) \cdot P(i, j)}{R(i, j) + G(i, j) + B(i, j)}, F_B(i, j) = \frac{3 \cdot B(i, j) \cdot P(i, j)}{R(i, j) + G(i, j) + B(i, j)}$$

4.1.4 Multiplicative method (MLT)

MLT je velice jednoduchá metoda, kdy se pouze násobí pixely multispektrálního a panchromatického snímku. Odmocnina ve vztahu slouží k tomu, aby se nezvětšoval jas výsledného obrázku.

$$M_k = \text{upsampling}(m_k) \quad (4.9)$$

K výpočtu tohoto vztahu na rozdíl od Brovey transform stačí pouze jeden multispektrální snímek [36].

$$F_k(i, j) = \sqrt{M_k(i, j) \cdot P(i, j)} \quad (4.10)$$

4.1.5 PCA method

PCA (Principal component analysis) je metoda analýzy dat, transformující data do nového souřadnicového systému, která hledá směry největšího rozptylu dat. Převede data do nových proměnných, které se nazývají hlavní komponenty, první komponenta je ve směru největšího rozptylu dat a hlavní komponenty jsou na sebe kolmé. Multispektrální obraz je možné rozložit PCA na jednotlivé komponenty, poté je první komponenta ta s největším rozptylem dat nahrazena panchromatickým snímkem.

Multispektrální obraz se opět převzorkuje na velikost panchromatického snímku.

$$M_k = \text{upsampling}(m_k) \quad (4.11)$$

Snímek se přetransformuje na sloupcový vektor.

$$M_k = \begin{bmatrix} M_k(1,1) & \dots & M_k(1,J) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_k(I,1) & \dots & M_k(I,J) \end{bmatrix} \rightarrow M_k = \begin{bmatrix} M_k(1,1) \\ M_k(1,2) \\ \vdots \\ M_k(I-1,J) \\ M_k(I,J) \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Dále se vypočítá střední hodnota vektoru M_k , odečte se od něj a získá se normovaný sloupcový vektor $M_{k_{norm}}$.

$$M_{k_{norm}} = M_k - \text{mean}(M_k) \quad (4.13)$$

Následně se vypočítá kovarianční matice C .

$$C = M_{k_{norm}} \cdot M_{k_{norm}}^T \quad (4.14)$$

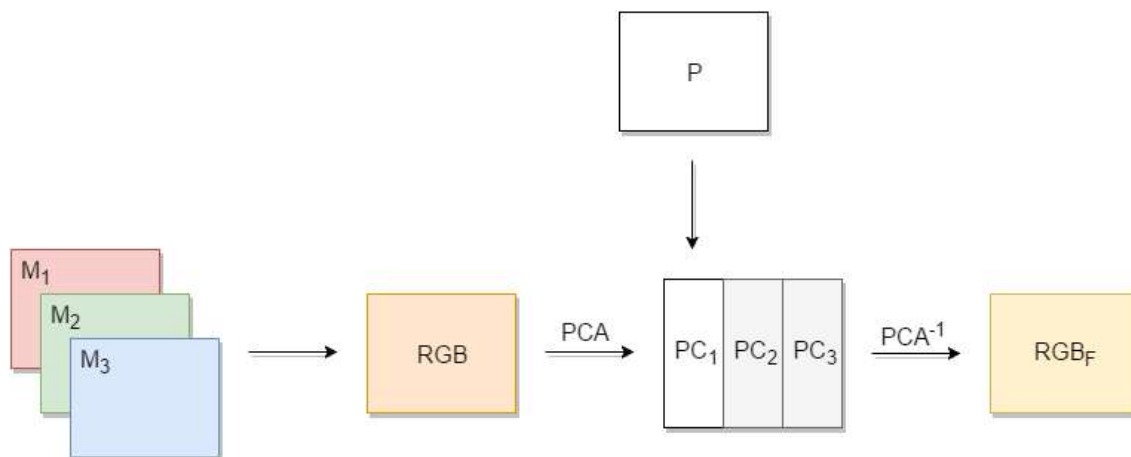
Poté se najdou vlastní čísla a vlastní vektory kovarianční matice. Vlastní vektory míří ve směrech rozptýlů dat a vlastní čísla jsou velikosti těchto vektorů. V Matlabu je na nalezení vlastních čísel a vlastních vektorů implementována funkce *eig*.

$$[V, \lambda] = \text{eig}(C) \quad (4.15)$$

Kde V jsou vlastní vektory a λ je vektor vlastních čísel. Nakonec se vypočítají hlavní komponenty Y snímku M_k .

$$Y = V \cdot M_k \quad (4.16)$$

Počet komponent se rovná počtu vstupních multispektrálních snímků. Hlavní komponenty se srovnají podle velikosti vlastních čísel a první komponenta (s největším rozptylem dat) se nahradí panchromatickým snímkem. Následně se provede inverzní PCA, schéma zvýšení detailů RGB snímku složeného ze tří multispektrálních pásem je na následujícím obrázku [8; 35].



Obr. 4.2 PCA method

4.1.6 Frequency Filtering method (HFF)

Následující tři metody pracují tak, že se z panchromatického snímku filtrací získá vysokofrekvenční informace, z P snímku se získá informace o detailech a poté se tyto detaily vloží do M_k snímku. Tyto metody se souhrnně nazývají HFF.

High-Pass Filtered Additive method (HPFA)

Zde se využívá filtr typu horní propust. Tento filtr extrahuje z panchromatického snímku detaily, které jsou poté přičteny k multispektrálnímu snímku.

$$M_k = \text{upsampling}(m_k) \quad (4.17)$$

HPFA metoda využívá filtr typu horní propust, jehož konvoluční jádro H_{hp} může být například takovéto.

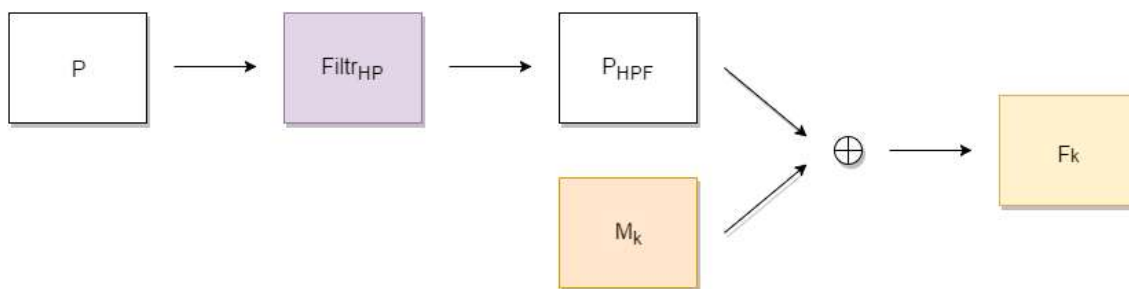
$$H_{hp} = \frac{1}{9} \cdot \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & +8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Filtrovaný obraz P_{HPF} se získá dvourozměrnou diskretní konvolucí přenosové funkce filtru H_{hp} a snímku P . V případě filtrovacího okna o velikost 3×3 může výpočet pro jeden pixel vypadat podle vztahu (4.19). Pokud se předpokládají pouze kladné indexy a matice H_{hp} je indexovaná od $H_{hp}(1,1)$ do $H_{hp}(3,3)$.

$$P_{HPF}(i,j) = \sum_{k_1=1}^{-1} \sum_{k_2=1}^{-1} P(i - k_1, j - k_2) \cdot H_{hp}(2 + k_1, 2 + k_2) \quad (4.19)$$

Poté se sečte M_k s vysokofrekvenční informací P_{HPF} a dostaneme snímek F_k .

$$F_k(i,j) = M_k(i,j) + P_{HPF}(i,j) \quad (4.20)$$



Obr. 4.3 High-Pass Filtered Additive method

High-Frequency Additive method (HFA)

HFA metoda je velice podobná předchozí, rozdíl je ve formě získání vysokofrekvenční informace z obrazu. V tomto případě je P snímek filtrován filtrem typu dolní propust, může to být například jednoduchý průměrující filtr a jeho jádro H_{lp} .

$$H_{lp} = \frac{1}{9} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Kde se opět snímek P_{LPF} vypočítá konvolucí P a H_{lp} snímků. Poté se vysokofrekvenční informace extrahuje z P snímku podle následujícího vztahu 4.22. Toto je postup takzvané neostré masky (unsharp masking), kde P_{USM} je neostrá maska.

$$P_{USM}(i, j) = P(i, j) - P_{LPF}(i, j) \quad (4.22)$$

Snímek F_k se získá opět součtem.

$$F_k(i, j) = M_k(i, j) + \alpha \cdot P_{USM}(i, j) \quad (4.23)$$

Koeficient α udává jak hodně nebo málo budou vysoké kmitočty zvýrazněny. Když $\alpha = 1$ neostrá maska se pouze přičte, při $\alpha > 1$ se vysoké kmitočty zesílí a pokud bude $\alpha < 1$ dojde naopak k potlačení vysokých kmitočtů.

High-Frequency Modulation method (HFM)

HFM se od předchozí varianty liší pouze v získání F_k . Opět je z panchromatického snímku získán nízko frekvenční snímek P_{LPF} . Výsledek se nezíská sčítáním, ale násobením [36].

$$F_k(i, j) = M_k(i, j) \cdot \frac{P(i, j)}{P_{LPF}(i, j)} \quad (4.24)$$

4.1.7 DCT based Image Fusion

Diskrétní kosinová transformace (DCT, Discrete Cosine Transform) našla velké uplatnění při zpracování obrazu. Asi nejznámější použití DCT je při kompresi obrazu konkrétně například v standardech JPG nebo MPEG. Definicí DCT existuje vícero druhů, pro dvojrozměrný signál DCT typu 2 je definována podle vztahu 4.25. Počítá se stejně jako jednorozměrná DCT ale v každém rozměru například nejdříve po řádcích a poté po sloupcích. Vstupní dvourozměrný signál je rozkládán do funkcí kosinus o různých frekvencích. Diskrétní kosinová transformace produkuje pouze reálné koeficienty frekvenčního spektra. Na první pozici je umístěna stejnosměrná složka, také se jí říká DC koeficient, ostatní složky se nazývají AC koeficienty.

$$X(k_1, k_2) = \alpha_{k_1} \cdot \alpha_{k_2} \cdot \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} M_k(m, n) \cdot \cos \frac{\pi \cdot (2 \cdot m + 1) \cdot k_1}{2 \cdot M} \cdot \cos \frac{\pi \cdot (2 \cdot n + 1) \cdot k_2}{2 \cdot N} \quad (4.25)$$

Kde

$$0 \leq k_1 \leq M - 1, \quad 0 \leq k_2 \leq N - 1$$

Kde

$$\alpha_{k_1} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{M}} & k_1 = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{M}} & 1 \leq k_1 \leq M - 1 \end{cases}$$

a

$$\alpha_{k_2} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}} & k_2 = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}} & 1 \leq k_2 \leq N - 1 \end{cases}$$

V tomto případě se snímky M_k a P převedou do oblasti prostorových kmitočtů. Poté podle určitých pravidel dojde ke sloučení spekter obou snímků a závěrem se provede inverzí DCT^{-1} .

Stejně jako v předchozích případech se musí vybraný multispektrální snímek navzorkovat na velikost panchromatického snímku.

$$M_k = \text{upsampling}(m_k) \quad (4.26)$$

M_k a P snímky se rozdělí podle potřeby na bloky 8×8 , 16×16 či 32×32 , které se převedou DCT transformací do kmitočtové oblasti. V následující části X_1 odpovídá transformovanému bloku snímku M_k a X_2 je transformovaný blok snímku P . Výsledný fúzovaný blok v kmitočtové oblasti je značený I_f , ten se následně převede DCT^{-1} na blok snímku F_k . Indexy $k_1, k_2 = 1, 2, 3, \dots, N$ jsou pozice pixelů transformovaného bloku velikosti $N \times N$. DC koeficient je na pozici $X_1(1,1)$ a $X_2(1,1)$. V oblasti prostorových kmitočtů se vhodným způsobem sloučí informace z M_k a P snímku, zde jsou některé možnosti, jak lze získat výsledný snímek.

DCT_{av}

Spektrum I_f se získá průměrem ze spekter X_1 a X_2 .

$$I_f(k_1, k_2) = 0,5 \cdot X_1(k_1, k_2) + 0,5 \cdot X_2(k_1, k_2) \quad (4.27)$$

DCT_{ma}

DC koeficient se získá průměrem a AC koeficienty se vyberou na základě největší amplitudy.

$$I_{f(1,1)} = 0,5 \cdot X_1(1,1) + 0,5 \cdot X_2(1,1)$$

$$I_{f(k_1, k_2)} = \begin{cases} X_1(k_1, k_2) & |X_1(k_1, k_2)| \geq |X_2(k_1, k_2)| \\ X_2(k_1, k_2) & |X_1(k_1, k_2)| < |X_2(k_1, k_2)| \end{cases} \quad (4.28)$$

DCT_{ah}

Zde je jediný rozdíl v tom, že koeficienty do $N/2 \times N/2$ se získají průměrováním a zbylé koeficienty se získají podle největší amplitudy.

$$I_f(k_1, k_2) = 0,5 \cdot X_1(k_1, k_2) + 0,5 \cdot X_2(k_1, k_2)$$

Kde $k_1, k_2 = 1, 2, \dots, \frac{N}{2}$

$$I_f(k_1, k_2) = \begin{cases} X_1(k_1, k_2) & |X_1(k_1, k_2)| \geq |X_2(k_1, k_2)| \\ X_2(k_1, k_2) & |X_1(k_1, k_2)| < |X_2(k_1, k_2)| \end{cases} \quad (4.29)$$

Kde $k_1, k_2 = \frac{N}{2} + 1, \dots, N$

DCT_e

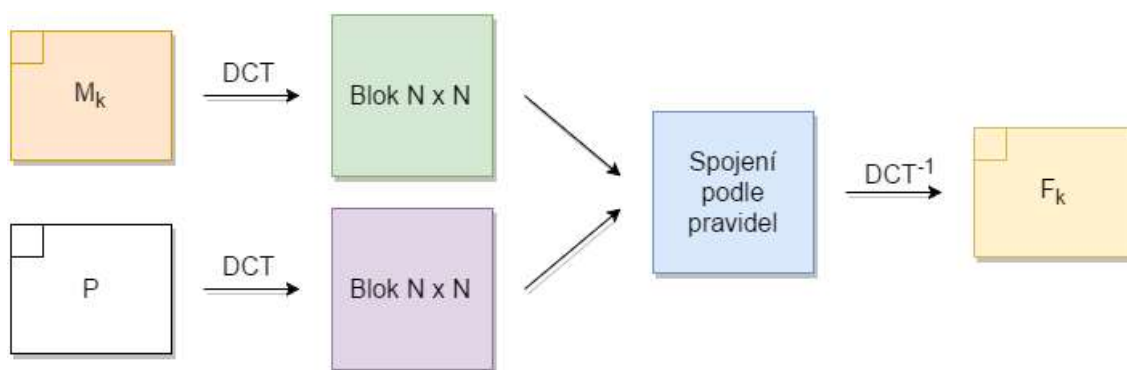
DC koeficient se opět získá průměrem a ze zbylých koeficientů se vybere vždy ten, jehož frekvenční pásmo E_{j1} nebo E_{j2} má větší energii.

$$I_f(1,1) = 0,5 \cdot X_1(1,1) + 0,5 \cdot X_2(1,1)$$

$$I_f(k_1, k_2) = \begin{cases} X_1(k_1, k_2) & E_{j1} \geq E_{j2} \\ X_2(k_1, k_2) & E_{j1} < E_{j2} \end{cases} \quad (4.30)$$

Kde $j = k_1 + k_2$

Následující obrázek ukazuje postup spojení dvou snímků DCT metodou. Z obou snímků se postupně vybírají bloky nejčastěji velikost 8×8 , ty se transformují DCT transformací do kmitočtové oblasti. Zde dojde ke sloučení obou spekter podle výše zmíněných pravidel a poté následuje DCT^{-1} [37].



Obr. 4.4 DCT based Image Fusion

4.1.8 DWT based Image Fusion

Tato metoda, jak již název napovídá, používá ke sloučení dvou obrázků diskrétní vlnkovou transformaci (Discrete wavelet transform, DWT). Při Fourierově transformaci je vstupní signál porovnáván s harmonickými funkcemi. Parametrem, který se zde mění, je frekvence, Fourierova transformace rozkládá signál do bázových funkcí sin a cos. Nevýhodou této transformace je, že pokud zkoumáme celý vstupní signál najednou tak máme dobré frekvenční rozlišení, ale špatné časové rozlišení. V opačném případě pokud ze signálu vybíráme postupně jen určité úseky, dostaneme dobré časové rozlišení, ale horší frekvenční rozlišení. Tato transformace se nazývá Short-Time Fourier Transform (STFT).

Alternativu nabízí vlnková transformace, která vhodným způsobem mění v čase velikost okna, takže umožňuje detekovat nejen obsažené frekvence, ale i jejich umístění v čase. Základ vlnkové transformace tvoří mateřská vlnka.

$$\psi_{\tau,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \left(\frac{t - \tau}{s} \right) \quad (4.31)$$

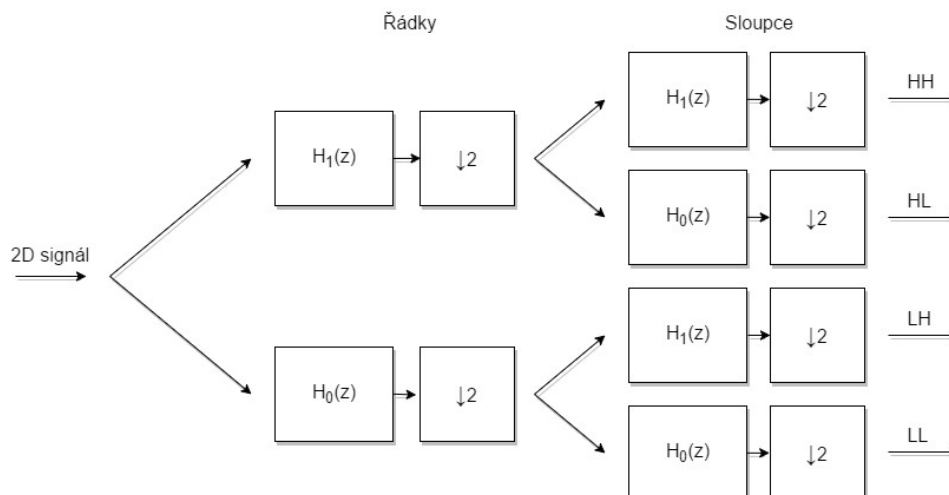
Kde s je měřítko, umožňující měnit velikost, šířku vlnky, proměnná τ představuje posun po ose t , proměnná t nemusí být jen čas, ale například i dráha nebo poloha a násobná konstanta $\frac{1}{\sqrt{s}}$ normuje výraz, pro jednotlivé změny měřítka. Spojitá vlnková transformace je definována následujícím vztahem 4.32.

$$W_f(\tau, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \overline{\psi_{\tau,s}(t)} \cdot dt \quad (4.32)$$

Pro diskrétní vlnkovou transformaci nabývají koeficienty s a τ pouze určitých hodnot, kde $s = 2^j$, $\tau = k \cdot 2^j$, $j, k \in \mathcal{Z}$.

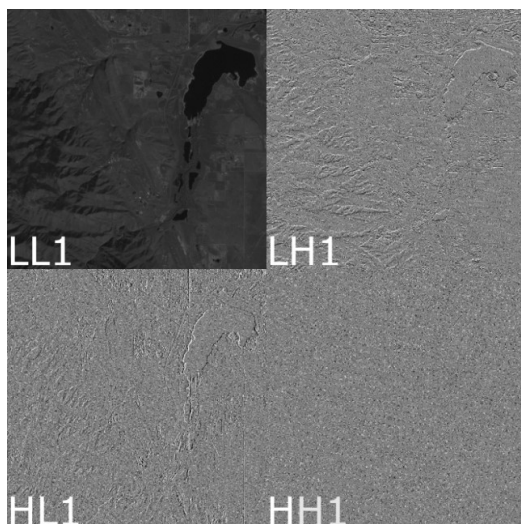
$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \cdot \left(\frac{n - k \cdot 2^j}{2^j} \right) \quad (4.33)$$

Výpočet diskretní vlnkové transformace lze realizovat bankou filtrů.

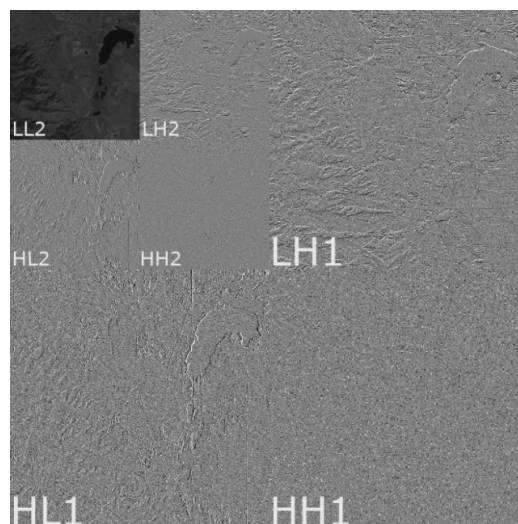


Obr. 4.5 Banka filtrů pro první stupeň dekompozice

Vstupní snímek se filtrací rozdělí do čtyř bloků. Výstup HH obsahuje detailní informace o snímku v diagonálním směru. Výstupy HL a LH, první obsahuje detailní informaci v horizontálním a druhý ve vertikálním směru. Výstup LL obsahuje aproximaci původního obrazu, je to vlastně vstupní obraz filtrovaný dolní propustí.



Obr. 4.6 První stupeň dekompozice



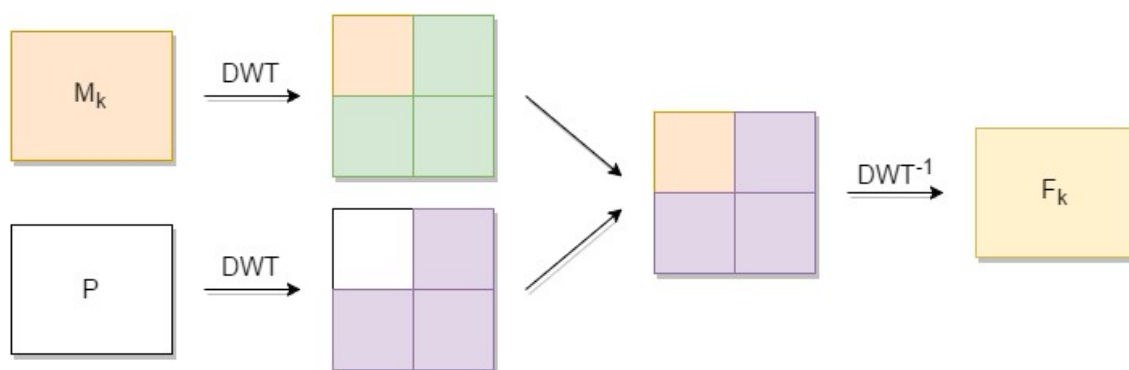
Obr. 4.7 Druhý stupeň dekompozice

Ve výsledku máme obraz rozložený do čtyř pásem, kde každé z nich nese jen určitou část informace. Snímek můžeme rozkládat dále a dále, stejný postup se aplikuje tentokrát na nízkofrekvenční snímek LL. V tomto případě obsahuje obrázek v levém horním rohu viz obr. 4.7 ještě méně informací o detailech než na obr. 4.6. Toho lze velmi dobře využít,

pokud chceme sloučit snímek, který nese informace o detailech se snímek, kde chceme zachovat informaci o spektrálních charakteristikách.

$$M_k = \text{upsampling}(m_k) \quad (4.34)$$

Opět se musí provést převzorkování, poté se oba dva snímky jak M_k tak P rozloží diskrétní vlnkovou transformací do jednotlivých frekvenčních subpásem. Obraz je filtrován podle obr. 4.5, úroveň dekompozice záleží na účelu použití. Když použijeme úroveň dekompozice jedna, u každého snímku dostaneme tři frekvenční pásma představující horizontální, vertikální a diagonální detaily viz obr. 4.6. Čtvrté pásmo obsahuje původní snímek zbavený detailů, které jsou obsaženy v předchozích třech pásmech viz obr. 4.6 levý horní roh. Sloučení můžeme provést tak, že vložíme detaily extrahované z P do M_k . Nízkofrekvenční informace z panchromatického snímku, aproximovaný P snímek se nahradí pásmem, které obsahuje nízkofrekvenční informaci o multispektrálním snímku viz následující obr. 4.8 [8; 31; 35].



Obr. 4.8 DWT based Image Fusion

4.2 HODNOCENÍ KVALITY

Důvodem sloučení panchromatického a multispektrálního snímku je zlepšení prostorového rozlišení multispektrálního snímku, zároveň se musí zabránit zkreslení spektrálních charakteristik. Z množství metod potřebujeme vybrat pro konkrétní použití tu nejvýhodnější. Pro porovnání kvality obrazu jsou na výběr dvě možnosti subjektivní a objektivní hodnocení. Použití subjektivního hodnocení není vhodné, po zvýšení prostorového rozlišení následuje počítačové zpracování, cílem není zobrazení snímku člověku. Je potřeba objektivně zhodnotit přidání struktury a zároveň zachování původní spektrální informace. Musíme se uchýlit k objektivní metrice. Pro měření kvality jsem využil hodnocení dle článku [38]. Pro výpočet spektrální kvality je zde použit Pearsonův korelační koeficient a měření struktury je provedeno metrikou Structural similarity (ssim). Výsledky jsou sloučeny do jediné hodnoty v článku nazvané Joint quality measurement (JQM). Dále jsem pro srovnání použil jednoduché metriky

Mean-squared error (MSE) a Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), porovnával jsem podobnost mezi MSE, PSNR a JQM.

V mnoha případech jdou při sloučení proti sobě parametry spektrální a prostorové rozlišení. Při dosažení dobrého prostorového rozlišení, dochází ke spektrálnímu zkreslení a naopak. Tyto charakteristiky jsou vidět na grafu 4.9. Modré sloupce představují hodnocení prostorové a oranžové spektrální kvality. Pokud je modrá hodnota níž, oranžová je výš, korelační koeficient vychází větší a hodnota SSIM je menší a naopak, je třeba volit kompromis mezi těmito charakteristikami.

Pro klasifikaci jsem použil data z družice Landsat 8, hodnocení jsem prováděl pro snímek složený z červeného, zeleného a modrého pásma, data byla pořízena 12. října 2015 a název souboru je LC81920252015285LGN00. V Tab. 4.1 je přehled použitých spektrálních pásem. Při hodnocení a následně pro zvýšení prostorového rozlišení družicových snímků jsem využil vytvořené metody IHS, BT, DWT, PCA ze stránek¹¹ a ze stránek¹² metody DCTav, DCTma, DCTe, DCTay, metody Mean, HPFA, HFA, HFM, MLT a ImRes jsem realizoval sám.

U metody DWT bylo hodnocení prováděno pro druhý stupeň dekompozice s vlnkou typu Haar, u metody HPFA jsem zvolil filtrační jádro H_{hp} a pro metodu HFA a HFM jádro H_{lp}

$$H_{hp} = \frac{1}{16} \cdot \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ -2 & +12 & -2 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad H_{lp} = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 9 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Tab. 4.1 Přehled použitých souborů

Název	Značka	PR
LC81920252015285LGN00_B8.tif	P	15 m
LC81920252015285LGN00_B2.tif	m_1	30 m
LC81920252015285LGN00_B3.tif	m_2	30 m
LC81920252015285LGN00_B4.tif	m_3	30 m

Poznámka: PR značí prostorové rozlišení snímku

Pro hodnocení se snažím zachovat stejné značení jako v předchozí části. Panchromatický a multisppektrální snímek značím opět P a m_k , výsledný sloučený snímek značený F_k a f_k je s polovičním prostorovým rozlišením. Výpočet hodnoty zkreslení uváděný v článku, je proveden pouze na základě znalosti F_k , m_k a P , není třeba mít multisppektrální obrázek stejného

¹¹ <https://github.com/sjtrny/FuseBox>

¹² <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/36345-discrete-cosine-transform-based-image-fusion-techniquesviz>

prostorového rozlišení jako panchromatický. Tento snímek ve většině případů dostupný není, avšak pro výpočet MSE a PSNR je potřebný.

4.2.1 Joint quality measurement (JQM)

Použité označení:

P Panchromatický snímek s 15 m prostorovým rozlišením

m_k Multispektrální snímek s 30 m prostorovým rozlišením

M_k Multispektrální snímek s 15 m prostorovým rozlišením, pro pan-sharpening

F_k Sloučený snímek s 15 m prostorovým rozlišením

Pearsonův korelační koeficient

Pearsonův korelační koeficient PCC je vypočítán dle vztahu 4.37 a výsledná hodnota je z intervalu $\langle -1, 1 \rangle$. Vztah vyjadřuje míru korelace mezi veličinou X a Y , v tomto případě mezi sloučeným a multispektrálním původním obrazem. Při výpočtu korelačního koeficientu se sloučený snímek podvzorkuje na velikost snímku m_k a filtruje filtrem typu dolní propust.

$$f_k = \text{downsampling}(F_k) \quad (4.35)$$

$$f_{k_{LPF}} = \text{lpf}(f_k) \quad (4.36)$$

Po této operaci by mělo dojít při výpočtu korelačního koeficientu pouze k porovnání barevného zkreslení způsobeného zvýšením prostorového rozlišení.

$$PCC_k = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (m_k(i, j) - \bar{m}_k(i, j)) \cdot (f_{k_{LPF}}(i, j) - \bar{f}_{k_{LPF}}(i, j))}{\sqrt{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (m_k(i, j) - \bar{m}_k(i, j))^2 \cdot (f_{k_{LPF}}(i, j) - \bar{f}_{k_{LPF}}(i, j))^2}} \quad (4.37)$$

Pokud jsou obrazy totožné, je výsledek rovný 1, výsledná hodnota by se měla přibližovat co nejvíce k 1.

Pro některé metody je nutné použít více spektrálních pásem najednou. Výsledná hodnota $CORR$ se spočítá jako aritmetický průměr, kde n je počet použitých pásem pro pan-sharpening.

$$CORR = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n PCC(m_k, f_{k_{LPF}}) \quad (4.38)$$

Structural similarity index (ssim)

Index $ssim$ se počítá mezi fúzovaným a panchromatickým snímkem. Pokud je nutné pro pan-sharpening využít více pásem, výsledek se opět získá jako aritmetický průměr.

$$SSIM = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n ssim(P, F_k) \quad (4.39)$$

$SSIM$ nabývá také hodnot z intervalu od $\langle -1, 1 \rangle$, kde hodnota blíže k 1 znamená lepší výsledek.

Joint quality measurement (JQM)

Z hlediska přehlednosti není výhodné využívat pro jeden obraz dva ukazatele kvality, kde každý představuje jinou veličinu. Z CORR a SIMM je možné vypočítat průměr, hodnota SSIM nabývá ve většině případů menší hodnoty než CORR. Před získáním jednoho čísla je lepší SSIM normovat $SSIM_{norm}$ dle vztahu 4.40. Celkový ukazatel kvality JQM se poté vypočítá podle 4.41.

$$SSIM_{norm} = \frac{SSIM - SSIM_{min}}{SSIM_{max} - SSIM_{min}} (CORR_{max} - CORR_{min}) + CORR_{min} \quad (4.40)$$

Po normování se vypočítá aritmetický průměr mezi CORR a $SSIM_{norm}$.

$$JQM = \frac{(CORR + SSIM_{norm})}{2} \quad (4.41)$$

Jak CORR tak SSIM nabývají hodnot z intervalu $\langle -1, 1 \rangle$ a JQM je také z rozsahu $\langle -1, 1 \rangle$, hodnota 1 značí totožné obrazy [38].

4.2.2 MSE a PSNR

Při výpočtu kvality metrikou PSNR a MSE jsem provedl podvzorkování panchromatického snímku a multispéktrálního snímku na polovinu.

$$p_{down} = \text{downsampling}(P) \quad (4.42)$$

$$m_{k_{down}} = \text{downsampling}(m_k) \quad (4.43)$$

Po této operaci má panchromatický snímek prostorové rozlišení 30 m a multispektrální snímek prostorové rozlišení 60 m. Pro pan-sharpening musí mít multispektrální snímek stejnou velikost jako panchromatický.

$$m_{k_{up}} = \text{upsampling}(m_{k_{down}}) \quad (4.44)$$

Pro hodnocení jsem měl sadu snímků, podvzorkovaný panchromatický snímek na polovinu značený p_{down} , multispektrální snímek podvzorkovaný na polovinu a zpět navzorkovaný na původní velikost pro pan-sharpening označený $m_{k_{up}}$, dále originální multispektrální snímek využitý jako reference s názvem m_k a posledním byl fúzovaný snímek f_k .

Použité označení:

- p_{down} Panchromatický snímek s 30 m prostorovým rozlišením
 m_k Referenční multispektrální snímek s 30 m prostorovým rozlišením
 m_{kup} Multispektrální snímek s 30 m prostorovým rozlišením, pro pan-sharpening
 f_k Sloučený snímek s 30 m prostorovým rozlišením

Mean-squared error (MSE)

MSE počítá pouze rozdíly mezi hodnotami obrazových bodů na stejném místě v obraze, nebere v potaz vylepšení obrazu přidáním detailů. I v případě vylepšení snímku se hodnota MSE zvýší. Pro výpočet MSE je nutné mít takový obraz, jak by měl v ideálním případě fúzovaný snímek vypadat. Toto není ve většině případů možné a původní snímky se musí podvzorkovat.

Jistým problémem MSE je závislost hodnoty na bitové hloubce. Hodnota $MSE = 100$ pro obraz s 8 bitovou hloubkou může být velkým zkreslením. Stejná hodnota $MSE = 100$ pro 16 bitovou hloubku obrazu je zkreslení, kterého si ani nevšimneme. Satelitní data mají obvykle velké bitové hloubky a hodnota MSE vychází značně velká i pro malé rozdíly mezi originálním a zkresleným obrazem.

$$MSE_k = \frac{1}{I \cdot J} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (m_k(i, j) - f_k(i, j))^2 \quad (4.45)$$

Hodnota 0 znamená, totožnost obrazů, větší hodnota znamená větší zkreslení. Při použití více pásem se celková hodnota MSE získá jako průměrná hodnota z hodnot MSE_k pro jednotlivá pásma [19].

Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)

Kvůli závislosti MSE na bitové hloubce je lepší použít PSNR, ve vztahu pro PSNR je maximální možná hodnota obrazového bodu. Například v Matlabu pro uint16 je hodnota $q = 65536$. Protože se PSNR počítá z MSE, je nutné opět znát ideální obraz.

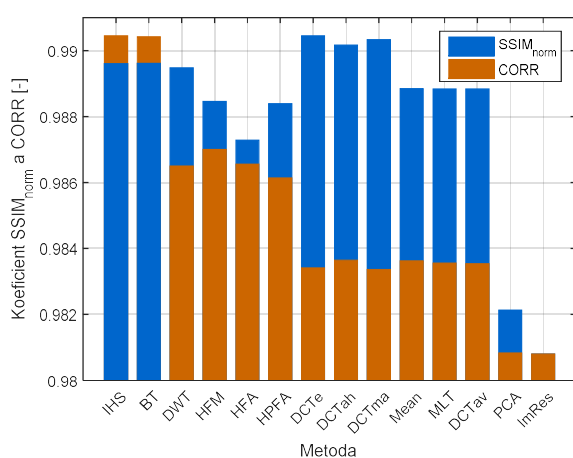
$$PSNR_k = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{(q - 1)^2}{MSE_k} \right) \quad (4.46)$$

Pro stejné obrazy vyjde $MSE = 0$ a $PSNR$ jde k nekonečnu. Čím je hodnota $PSNR$ větší tím více jsou si obrazy podobné. Pro získání hodnoty $PSNR$ pro více pásem se za MSE_k dosadí MSE [19].

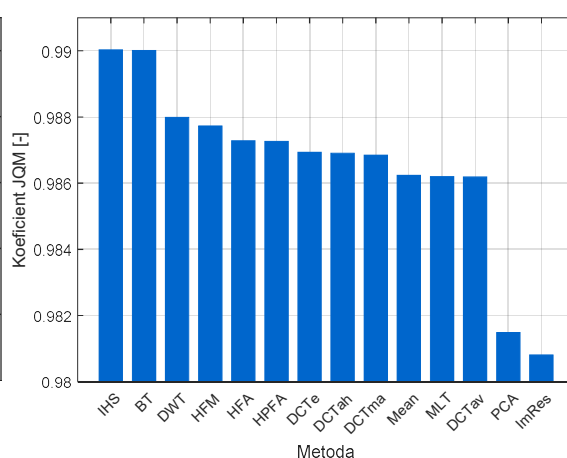
4.2.3 Výsledné hodnoty

Na obr. 4.9 je průběh normované hodnoty $SSIM_{norm}$ a korelačního koeficientu. Z části je vidět, že se metriky $SSIM$ a $CORR$ doplňují. Když je hodnota $SSIM_{norm}$ pro určitou metodu vyšší $CORR$ se sníží a naopak. Například metody založené na DCT mají hodnotu $SSIM_{norm}$ největší, ale dochází u nich ke značnému spektrálnímu zkreslení.

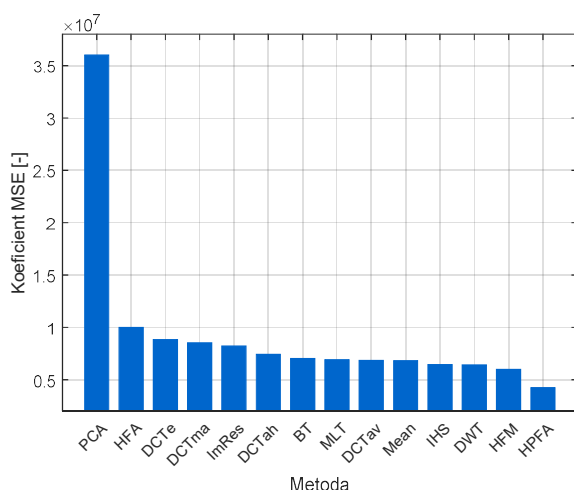
Obrázek Obr. 4.10 znázorňuje průběh JQM, metody jsou seřazené podle hodnoty JQM od největší po nejmenší hodnotu. Nejlépe se umístila metoda IHS, nejhůře z hodnocení vyšlo pouhé převzorkování obrazu na dvojnásobnou velikost v Matlabu funkcí *imresize*, v grafech nazvané ImRes.



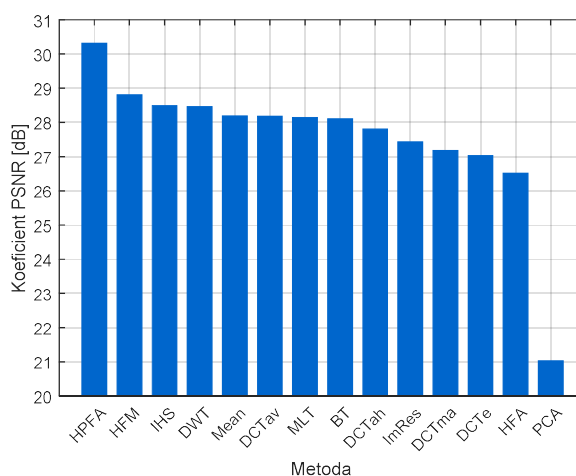
Obr. 4.9 Hodnoty $SSIM_{norm}$ a $CORR$



Obr. 4.10 Hodnoty JQM



Obr. 4.11 Hodnoty MSE



Obr. 4.12 Hodnoty PSNR

Podle obr. 4.10 na prvních dvou místech vyšly metody IHS a BT, i na obrázcích v přílohách B viz obr. 89 – 90 je patrné, že tyto metody vylepší prostorové rozlišení, bez viditelného barevného zkreslení pro pásma v modré, zelené a červené části spektra. Za nimi

následují DWT a filtrační metody, podle obr. 4.10 se DWT, HFM, HFA a HPFA liší převážně v množství přidání detailů viz modré sloupce. Barevné zkresení počítané korelačním koeficientem pro tyto metody vyšlo podobně.

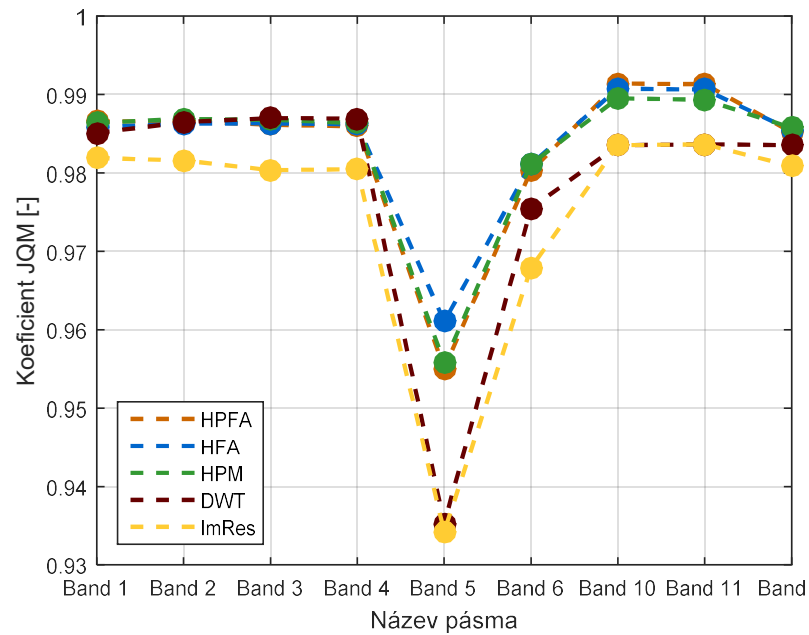
Zbylé metody již způsobovali značné barevné zkresení, to je patrné i na snímcích viz obr. 87 – 101 v přílohách B. DCTe, DCTah a DCTm přidaly do obrazu nejvíce detailů viz obr. 4.9 modré sloupce, ale za cenu velkého barevného zkresení viz oranžové sloupce. Nejhůře vyšly PCA a ImRes, ty selhaly jak u zvýšení prostorového rozlišení, tak i v případě barevného zkresení.

Na grafech 4.11 a 4.12 je průběh MSE a PSNR. Vhodnosti jednotlivých metrik je těžké posoudit. U všech třech metrik se na prvních místech umístili DWT, HFM, HPFA a IHS, Brovey transform se u MSE a PSNR propadla na prostřední místo. U MSE a PSNR je podle mého názoru problémem, že se jen navzorkovaný obraz neumístil na posledním místě, což by podle všeho měl. Další otázkou je dobré umístění metody Mean, pokud se udělá pouze průměr mezi panchromatickým a multispektrálním snímkem, tak hodnoty MSE a PSNR pro Mean vyjdou lépe než pro Brovey transform, což neodpovídá vizuálnímu dojmu.

Při hodnocení jsem se přiklonil k metrice JQM, jednak z výše zmíněných důvodů, ale také, že i podle mého názoru nejlépe odpovídá vizuálnímu hodnocení jednotlivých metod.

V metrice JQM vyšly na prvních místech metody IHS, BT, DWT, HFA, HFMA a HFM. IHS a BT potřebují pro pan-sharpening tři pásma, to může být z části nevýhodu, také již z důvodu načítání obrázků, které nejsou následně potřeba.

Pro použití v další části jsem tedy vybral metody DWT, HFA, HFMA a HFM. Tyto čtyři metriky jsem ještě analyzoval na jednotlivých spektrálních pásmech, vstupem těchto metod bylo vždy jen jedno pásmo a pro fúzovaný obraz jsem spočítal hodnotu JQM. Pro posouzení nejhorší kvality jsem opět použil navzorkovaný obraz. Z obrázku obr 4.13 je patrné, že vyjma ImRes, si tyto metody do pásma 4 vedou přibližně stejně. Velký propad nastává v pásmu NIR, zde se DWT velmi blíží ImRes. HFA, HFMA a HFM také vychází lépe v pásmu SWIR a tepelné oblasti. Pro tyto metody také mluví menší výpočetní náročnost viz přílohy B tab. 4 sloupec Čas.



Obr. 4.13 Hodnoty JQM pro pět vybraných metod a pro různá pásma

V následujících částech ještě porovnávám vliv metody HFA, HFMA, HFM, DWT na vegetační index NVDI a také na teplotní snímek. U porovnání vlivu zvýšení prostorového rozlišení na NVDI jsem ještě znovu pro srovnání použil metody IHS a BT.

5 Možné způsoby využití satelitních dat v městské aglomeraci

V předchozích kapitolách byl popsán obecný princip dálkového průzkumu Země, dva zdroje volně dostupných dat a možné způsoby zvýšení prostorového rozlišení u družicových snímků. Program Copernicus poskytuje v optické části spektra prostorové rozlišení až 10 m, naopak družice Landsat mohou nabídnout zajímavý pohled do blízké minulosti a pásmo tepelného vyzařování objektů na Zemi. V této části bych se rád zaměřil na možné aplikace družicových dat v městské aglomeraci.

Značným problémem využitelnosti volně dostupných družicových dat pro městské aglomerace je nutnost velkého prostorového rozlišení, v lepším případě by na snímcích mělo jít rozpoznat jednotlivé domy, parky, silnice či ulice. V úplně ideálním případě bychom mohli být schopni vidět auta, lidi nebo i pohozené věci na chodníku. Této situaci se přibližují data z programu Copernicus, ale ve většině případů to zatím není zdaleka dokonalé. Také je možné využít pan-sharpening, ale po zvýšení prostorového rozlišení je nutné sledovat vliv způsobeného zkreslení. Jiné možnosti nabízejí placená data, ale zde se již naskytuje ekonomická otázka. Je nutné využití družicových dat? Není dostačující, levnější běžné pozorování ze země?

Dalším aspektem je časové rozlišení, to je s běžnou 10 denní dobou opětovného snímání pro většinu aplikací dostačující. Jistým problémem hlavně v podzimních a zimních měsících může být oblačnost, která znemožňuje použití obrázků. Mohou se prodlužovat úseky, kdy o sledované aglomeraci nejsou žádné údaje.

Pro hlubší porozumění rozvoje městských aglomerací by bylo výhodnější mít i snímky z daleké minulosti. Bohužel dálkový průzkum Země se provádí od 70 let, pokud se nepočítají vojenské projekty, pro historické studium je nutné využít jiné zdroje.

Přesto mohou družicové snímky nabídnout jiný a jistě zajímavý pohled na místa, kde žijeme. Informace lze využít k prohloubení znalostí o životě lidí ve městech. Druhou stránkou je využití satelitních dat k dalšímu rozvoji města, stavby veřejné infrastruktury či nových obytných domů. Dalším důvodem může být využití v místech, kde žádné takové informace neexistují například místa poničená válkou, kde je potřeba získat ucelený pohled na rozsah poškození, oblasti zasažené zemětřesením, sopečnou činností nebo města, kde třeba chybí veřejná zpráva.

Velký význam může mít kombinace satelitních snímků s jinými zdroji dat, prohlížet město pouze ze satelitních snímků nemusí být dostačující. Využití může mít kombinace satelitních dat s údaji z matričního úřadu, meteorologických stanic, s informacemi o dopravní, ekonomické či

hospodářské situaci města nebo kraje. Nevýhodou je další zvýšení náročnosti zpracování těchto dat.

5.1 KRIZOVÉ ŘÍZENÍ

Jednou z důležitých oblastí využití družicových dat je krizové řízení. Živelné pohromy v blízkosti obydlených oblastí způsobují velké oběti na životech a obrovské materiální škody. Všeobecnou snahou je těmto katastrofám předcházet, informace ze satelitních snímků mohou napomáhat při odhalení nebezpečí, případně pomoci při odstraňování následků katastrof. Poznatky získané dálkovým průzkumem Země slouží k monitorování zemětřesení, sopečné činnosti, povodní nebo hurikánů. Po neštěstí mohou napomoci v orientaci, při odklizení následků pohromy nebo při obnově infrastruktury.

5.1.1 Ochrana před neštěstím

Na snímcích získaných pasivním i aktivním snímáním je možné sledovat různé deformace a pohyby povrchu země. U obrazových snímků s velkým prostorovým rozlišením lze určit opěrné body a zjišťovat pohyby těchto bodů, radarové měření využívá fázových rozdílů mezi odraženým zářením, lidar umožňuje snímání vzdálenosti mezi nosičem a povrchem a určení změny vzdálenosti v čase.

Užitečné je snímání teploty povrchu, nejen v okolí aktivní sopky, ale i v místě častých zemětřesení, zjistilo se, že zemětřesením předcházejí různé anomálie teploty povrchu Země. S erupcí sopky nebo zemětřesením také souvisí změny koncentrace různých plynů v ovzduší. Družice mohou zjišťovat obsah plynů, nebo změny poměrů plynů.

Satelitní data nabízejí celkový náhled na situaci a mohou napomoci k pochopení všech jevů související s fyzikálními procesy Země. V případě zemětřesení a sopečné činnosti slouží spíše jako doplňkové informace k pozemnímu měření. Zde může být kritická časová rozlišovací schopnost, pozemní snímání nabízí nepřetržité sledování situace, ale nezastupitelnou roli při sledování hurikánů či bouří hrají meteorologické družice.

Pokud hrozí nebezpečí povodní, může se z modelu terénu odhadnout velikost zaplavených oblastí, při znalostech výškového modelu terénu, dešťových srážek, údajích o zastavěných a nezastavěných plochách, množství rostlinstva, vlastnostech materiálů lze určit budoucí výšku vody v obydlených oblastech a na základě těchto údajů varovat obyvatele v krizových místech.

Využití radarové interferometrie

Pro vytvoření výškového modelu terénu nebo určení pohybu objektů na zemi se využívá radarová interferometrie. Při měření radarem se detekuje amplituda i fáze odraženého paprsku, uložené obrazové body jsou komplexní čísla, obsahují hodnotu amplitudy a fáze. Fáze nese informaci o vzdálenosti měřicího zařízení od objektu. Pokud bychom měli jenom jeden obrázek s informací o fázi, tak z něj nelze nic určit, nevíme, kolikrát se na měřeném úseku zopakuje, perioda přijatého signálu. K získání informace o pohybu nebo vzdálenosti se porovnají snímky jedné družice v různých časových úsecích, nebo data ze dvou družic na jiných drahách v jeden čas.

Z časového sledu radarových snímků jedné družice lze z rozdílů fáze zjistit pohyby objektů na zemi. Pokud se bude pixel na dvou snímcích o stejné souřadnici lišit ve fázi, došlo ke změně pozice povrchu. Důležité je porovnávat místa, která mají dobrou odrazivost a nepohybují se v čase vlivem jevů, které nechceme pozorovat. Například parkoviště není dobrá referenční plocha.

Druhou možností je využití dvou družic na rozdílných drahách. Z rozdílů fáze přijatých paprsků je možné určit relativní výšku povrchu, pro absolutní výšku je nutné znát referenční body a jejich výšku. Mapa rozdílů fází dvou družic se nazývá interferogram, na rozdíl dvou interferogramů jsou vidět změny výšky povrchu druhého interferogramu oproti prvním.

Detekovatelné změny jsou v řádu centimetrů, to odpovídá délce elektromagnetické vlny v mikrovlnném spektru. Měření nemusí dosahovat takové přesnosti jako konveční metody, ale může pokrýt velkou část území. Radarovou interferometrii je možné využít pro monitorování zemětřesení, pohybu budov, mostů, továren, elektráren, pohybu půdy nad městem, k detekci nestabilních povrchů, kde není vhodné provádět stavební činnost.

5.1.2 Pomoc po katastrofě

Snímky lze využít následně po živelné katastrofě pro odhad škod, pomoc při budování nové infrastruktury, detekci rizikových míst, kde hrozí pád budov a míst kam by měl být zakázán vstup.

5.1.3 Vytvoření krizových zón

Následně po katastrofě lze určit riziková místa, oblasti, které byly zasaženy katastrofou. Srovnání snímků před a po katastrofě odhalí postižená místa, oblasti, kam při povodních dosáhla voda, místa zasažená zemětřesením, vlnou tsunami nebo výbuchem sopky. Tyto mapy mohou sloužit pro prevenci před budoucí katastrofou. Vytyčí se místa, kde je rizikové stavět

nové budovy nebo se zde musí stavět budovy odolné proti otřesům či poryvům větru. Snímky povodní odhalí, kde třeba nově postavit hráze, aby se voda při budoucí povodni nedostala dál do dalších čtvrtí města. Tyto údaje ve velké míře využívají pojišťovny pro určení výše pojistného v rizikové oblasti. Snímky mohou dobře sloužit v kombinaci s plánem katastrálních map.

5.2 ÚZEMÍ

Data ze satelitních snímků pomáhají při správě města, nabízejí jedinečný náhled na město z výšky. Umožňují sledovat proměnu města v ročních obdobích nebo v průběhu let. Velkým omezením využívání satelitních snímků pro rozvoj města je potřeba značného prostorového rozlišení, jednou z možností je nákup satelitních snímků nebo vytvoření snímků vysokého rozlišení pomocí úpravy pan-sharpening.

5.2.1 Mapování stavu komunikací

Na snímcích s prostorovým rozlišením menším než 1 m lze pozorovat využití parkovišť, vyhodnocovat městský provoz, detekovat vytíženost komunikací. Na základě dosažených poznatků se podá návrh na zlepšení daného stavu.

Provoz na komunikacích je také možné sledovat v střední infračervené oblasti. Silnice, kde projede více aut, budou teplejší, než opuštěné cesty mezi malými městy.

Optická data mohou sloužit k vyhodnocení stavu vozovky, například analýzou struktury povrchu. Poruchy vozovky jsou nehomogenity na jinak stejnorodém povrchu. Druhou možností je využít hyperspektrálních dat, předpokládá se, že nová vozovka má jiné složení než stará. Hyperspektrální data se mohou použít pro analýzu chemického složení vozovky viz článek [39].

5.2.2 Počítání počtu obyvatel

Z počtu budov a údajů, kolik lidí žije průměrně v jednom obydlí, se spočítá počet obyvatel města nebo jeho částí. Počítání nabývá na významu v oblastech, kde jsou informace o počtu obyvatel nedostupné, v místech se špatnou kvalitou života. Získávání informací o počtu obyvatel je využitelné pro prevenci proti šíření epidemií, mohou se detekovat oblasti, kde žije na malém prostoru velký počet osob ve špatných hygienických podmínkách.

5.2.3 *Růst města*

U snímků, které nabízejí dlouhodobý archiv dat, lze sledovat rozrůstání měst, městských čtvrtí v dlouhodobém horizontu. Snímky mohou mít velký význam v místech, kde nejsou informace tohoto typu dostupné, slumy v Africe, favely v Jižní Americe.

Na základě predikce růstu města, je možné předpovídat potřebné množství finančních prostředků, které bude nutné vynaložit pro další rozvoj infrastruktury.

Můžeme také analyzovat části města, poměr parků, zastavěných a nezastavěných ploch. Velký význam může mít i kombinace struktury města, městských čtvrtí v závislosti na spokojenosti obyvatel, složení obyvatelstva, průmyslu či nezaměstnanosti v kraji.

5.2.4 *Vyhodnocení volných ploch*

Satelitní data lze využít k rozlišení zastavěné a nezastavěné plochy na základě spektrálních vlastností nebo struktury. Homogenní plochy budou vykazovat podobné vlastnosti na rozdíl od zastavěných částí.

Identifikované volné plochy se mohou využít pro stavbu parkovišť, parků, obchodních domů, bytových jednotek. Použití satelitních snímků šetří čas a peníze, které by se musely utratit pro obchůzku městem a plochy obestavěné budovami nemusí být vidět vůbec.

5.2.5 *Výškový model města*

Lidar nebo radar umožňuje vytvoření výškového modelu města a jeho okolí. Tyto informace pomáhají pro vytyčení přirozených míst pro stavbu domů, silnic, koleji. Na základě výšky je také lze rozlišit silnice, parkoviště či domy. Výškový model města přidává důležité doplňkové informace k analýze struktury města. Například, pokud vozovku nerozlišíme pouze na základě spektrálních vlastností, bude možné ji jednoznačně identifikovat podle rozdílu výšky.

5.3 **ZNEČIŠTĚNÍ MĚSTEM**

Město ovlivňuje krajinu v okolí, je tvořeno materiálem, který akumuluje velké množství tepla. Zvyšuje se množství smogu, prachových částí, dochází k odlesňování krajiny. Všechny tyto zásahy negativním způsobem ovlivňují život lidí i živočichů v blízkosti města. Dálkový průzkum Země umožňuje sledování těchto jevů z jiného úhlu pohledu.

5.3.1 Detekce míst s malou odrazivostí

Místa, pohlcující velké množství záření, vytvářejí tepelné ostrovy, které jsou ve většině případů nežádoucí. Z naměřených hodnot záře přepočítaných na odrazivost, je možné tato místa identifikovat (plochy s velmi malou odrazivostí). Na základě těchto údajů lze například upravit střechy budov a v létě uspořít za klimatizaci. Nevyužité plochy, které akumulují velké množství záření, se mohou přebudovat na parky či odpočinková zařízení.

5.3.2 Kvalita vegetace v městě a okolí

Družicové snímky dovolují dlouhodobé sledování zdravotního stavu porostu ve městě a jeho okolí. Pokud jsou k dispozici data z dlouhodobého časového horizontu, je možné vyhodnotit vývoj vegetace ve městech.

5.3.3 Ovzduší nad městem, složení vzduchu, množství oblačnosti

Ovzduší výrazně ovlivňuje kvalitu života ve městech. Je možné provést analýzu množství různých plynů, oblačnosti nad městem, složení prachových částic, smogu. Zajímavé informace může přinést porovnání složení a vlastností vzduchu se strukturou, s rozlohou či průmyslem města nebo počtem jeho obyvatel.

5.3.4 Teplota města

V termálním pásmu lze sledovat tepelné vyzařování města a jeho částí. Naměřené radiometrické veličiny je možné přepočítat na hodnoty teploty. Může se sledovat celkové teplotní rozložení, což by pouze pozemním měřením nešlo. Tento přístup je méně přesný, ale mapuje najednou rozlehlé území.

5.3.5 Znečištění vod v blízkosti města

Na snímcích je možné analyzovat spektrální vlastnosti vod, v blízkosti měst nebo protékajících městem, zjišťovat, jakým způsobem velké město ovlivňuje kvalitu vody. Mohou se porovnat spektrální vlastnosti řek před vtokem do města a následně určit spektrální vlastnosti řeky vytékající z města. Stejným způsobem se může sledovat tepelné znečištění řek.

Obdobně lze hledat nové zdroje pitné vody v suchých oblastech nebo se kontroluje kontaminace nádrží pitné vody ve velkých městech, kde je problém s nadměrným znečištěním [9; 10; 24].

6 Analýza hlavního města Prahy

Data získaná dálkovým průzkumem Země je možné využít ve městě pro spoustu aplikací. Zaměřil jsem se na analýzu, která jde realizovat zejména s ohledem na omezené prostorové rozlišení volně dostupných dat. Dalším kritériem byly výpočetní nároky, satelitní obrazová data mají obvykle velkou velikost a některá je obtížné zpracovat na osobním počítači.

V práci jsem sledoval dopad zvýšení prostorového rozlišení na vegetační index NVDI a na teplotní snímek. Dále jsem zkoumal vliv množství zeleně na teplotu a na množství prachových částic města. Jako poslední jsem sledoval změnu hodnoty indexu NVDI v průběhu roku 2015 a 2016 a vývoj vegetace v průběhu let 1984 – 2016 v Praze.

Při zpracování družicových snímků je někdy nutné rozdělit obraz na oblasti s podobnými spektrálními vlastnostmi. V práci jsem převážně potřeboval rozlišit množství zeleně v jednotlivých oblastech města Prahy. Při rozboru počtu biomasy, lze použít řízenou i neřízenou klasifikaci, vegetační indexy či v poslední době hojně využívané neuronové sítě.

6.1.1 Řízená a neřízená klasifikace

Jak bylo zmíněno v kapitole 2, každý předmět na Zemi odráží na různých vlnových délkách jiné množství záření. Jednotlivá spektrální pásma tvoří osy multispektrálního prostoru, většinou není potřeba použít všechny snímky, protože informace mezi nimi často bývá vysoce korelovaná. Předměty s odlišnými vlastnostmi budou zaujímat různá místa v tomto prostoru, obraz se rozdělí na pixely (objekty), které vykazují stejné spektrální vlastnosti. Takovouto klasifikaci můžeme dělit na řízenou nebo neřízenou.

U řízené klasifikace si určíme počet informačních tříd a vlastnosti pixelů, které patří do každé třídy. Vytvoříme si námi definované skupiny a následně podle určitého rozhodovacího pravidla, přiřazujeme jednotlivé obrazové body do konkrétní skupiny. Pro řízenou klasifikaci je možné použít například klasifikátor pravouhelníků, k-nejbližších sousedů nebo klasifikátor maximální pravděpodobnosti.

Při neřízené klasifikaci si volíme pouze počet výsledných tříd, charakter skupin si vytvoří algoritmus sám. Jednotlivé pixely se přiřadí opět do té třídy, se kterou mají nejpodobnější vlastnosti. Neřízená klasifikace může být realizována například metodou ISODATA nebo K-means clustering [1; 7; 19].

6.1.2 Neuronové sítě

Neuronové sítě se snaží ve své činnosti napodobit funkci neuronů v živých organismech. Základním stavebním prvkem umělé neuronové sítě jsou neurony, které mohou mít velký počet vstupů, ale vždy mají pouze jeden výstup. Spojením jednotlivých neuronů vznikne neuronová síť. Existuje velké množství neuronových sítí, které se liší podle zapojení neuronů, typu učících algoritmů či přenosových funkcí.

Jedna z mnohých sítí, kterou lze využít pro klasifikaci je Samoučící se neuronová síť (Self organizing map, SOM). Neuronové sítě je nejprve nutné natrénovat na vstupní data. SOM při trénování shlukuje obrazové body, v tomto případě, s podobnými spektrálními vlastnostmi do jedné skupiny, podobně jako při neřízené klasifikaci a také se zde volí cílový počet tříd. U této sítě je výhodnou, že pro natrénování není nutné mít tréninkovou množinu. Následně po naučení sítě, jsou vstupní pixely přiřazovány do té skupiny, se kterou mají nejpodobnější vlastnosti.

Druhou možností je využití například Dopředných vícevrstevných neuronových sítí (Feedforward neural network, FNN), zde již je nutné pro naučení sítě znát cílové třídy. Pro trénování musíme mít určitý počet vstupních pixelů se zvolenou spektrální dimenzí a výstupní shluky, kam který pixel náleží. Po naučení sít opět klasifikuje obrazové body do skupin podle podobných vlastností [1; 19].

6.1.3 Spektrální indexy

Další možností je využití spektrálních indexů, ty zvýrazní některou ze složek v obraze, například vegetaci. Spektrálních indexů existuje velké množství, mezi nejznámější patří normalizovaný vegetační index NVDI, index pro detekci vodních ploch NDWI nebo index pro detekci zastavěných oblastí NDBI. Nejvíce používané spektrální indexy lze rozdělit do dvou velkých skupin na poměrové a ortogonální.

Jednoduchým poměrovým indexem je například Ratio Vegetation index *RVI*.

$$RVI = \frac{NIR}{R} \quad (6.1)$$

Tyto indexy dávají do poměru hodnoty pixelů obvykle ze dvou pásem, předpokladem je, že zkoumané objekty v jednom pásmu odrážejí velké množství a v druhém pásmu skoro žádné záření.

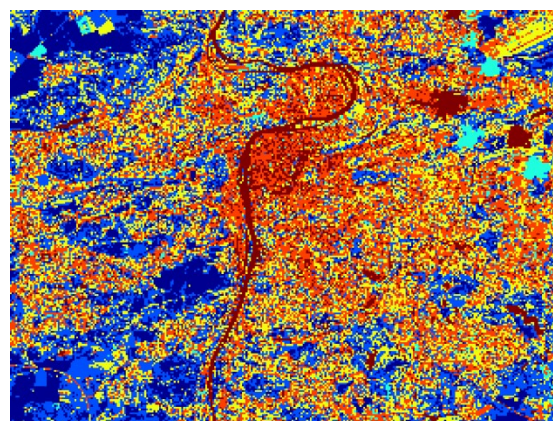
Ortogonální indexy se vypočítají lineární kombinací původních pásem, jsou založeny na stejném principu jako analýza hlavních komponent. Rotací os multispektrálního prostoru dojde

k zvýraznění některých složek původních dat, mezi ortogonální indexy patří například Perpendicular vegetation index PVI nebo transformace Tasseles Cap [1].

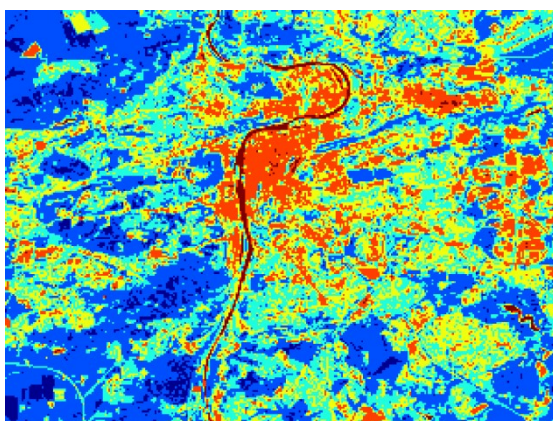
Na následujících obrázcích je ukázka použití metody K-means a indexu NVDI. Index NVDI nabývá hodnot od -1 do 1, tento interval jsem rozdělil na 6 úseků (-1 – 0, 0 – 0,2, 0,2 – 0,4, 0,4 – 0,6, 0,6 – 0,8 a 0,8 – 1). Tyto oblasti jsou zobrazeny na obr. 6.3. Obrázek 6.2 byl získán metodou K-means za použití červeného a blízkého infračerveného pásma, u obrázku 6.4 byly pro metodu K-means použity všechna pásma družice Sentinel-2A, u obou způsobů byl nastaven cílový počet shluků na šest.



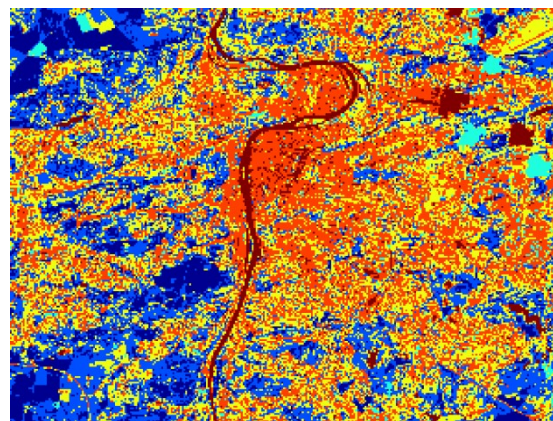
Obr. 6.1 Sledována oblast



Obr. 6.2 K-means clustering s pásmy R a NIR



Obr. 6.3 Prahovaný index NVDI



Obr. 6.4 K-means clustering s 13 pásmy

Použitím spektrálních indexů dostaneme odstupňované hodnoty, v tomto případě například podle kvality vegetace, při řízené nebo neřízené klasifikaci je výsledkem obraz rozdělený na oblasti s podobnými spektrálními vlastnostmi obrazových bodů.

Modré plochy na obr. 6.2 – 6.4 mají přibližně podobné rozložení, tyto plochy odhadem odpovídají vegetaci. Index NVDI a K-means dávají při sledování vegetace podobné výsledky, ale velký rozdíl je v použití. U NVDI se jednoduchým prahováním může získat přibližná plocha zeleně, při neřízené klasifikaci se musí složitě vybírat oblasti, které odpovídají vegetaci.

Daleko větším problémem při práci s daty družice Sentinel-2A je rozdílné prostorové rozlišení jednotlivých pásem, pro klasifikaci musí mít všechna pásma stejné prostorové rozlišení. Pokud se používají pásma s rozdílným prostorovým rozlišením, musí se podvzorkovat na nejhorší využití prostorové rozlišení. Na rozdíl od indexu NVDI, kde vystupují pouze dvě pásma, tato pásma mají u družice Sentinel-2A 10 metrové rozlišení. K-means pouze s pásmy R a NIR dává podle mého názoru horší výsledek než index NVDI, vyskytují se zde ve velké míře osamocené pixely s jinými třídami, než je okolí. Plochy získané indexem NVDI jsou daleko homogennější, tento index je také nepoměrně jednodušší na výpočet. Obdobný problém nastane při využití řízené klasifikace, neuronové sítě SOM či FNN, zde je také nutné mít vstupní snímky se stejným prostorovým rozlišením.

Objektová klasifikace a hierarchické třídění

Další možnosti nabízí například objektová klasifikace, kdy se předpokládá určitá závislost mezi blízkými pixely. Neočekává se, že například pixel, který je klasifikovaný jako vegetace, bude pouze jeden, ale že vedle něj budou i další podobné pixely. Obrazové body, které jsou blízko sebe a mají podobné vlastnosti, se spojí do jedné oblasti. Podobnost se posuzuje například z hlediska spektrálních vlastností, homogenity, textury či tvaru spojené oblasti.

Při hierarchickém třídění se mohou oblasti nejprve rozdělit podle spektrálních vlastností například na vodu, vegetaci a zastavěné oblasti. Zeleň se dále roztrídí za využití užších spektrálních pásem a struktury na různé druhy stromů a město podle tvaru objektů na typy budov [1].

Z důvodu obtížného odhadu spektrálních vlastností vegetace pro řízenou klasifikaci nebo pro natrénování neuronové sítě a jisté složitosti výběru oblastí, které ještě patří k vegetaci při neřízené klasifikaci či u sítě SOM, jsem v této práci pro použití vybral vegetační indexy. Vegetační indexy podle mého názoru dávaly velmi dobré výsledky, proto bych je v následující části popsal trochu podrobněji.

6.2 VEGETAČNÍ INDEXY

Vegetace tvoří důležitou součást městských aglomerací, poskytuje místo k odpočinku obyvatelům města, ochlazuje území města. Zvýšení počtu zeleně je jednou z možných ochran proti tepelnému ostrovu. Slouží k zachytávání prachových částic nebo v neposlední řadě vytváří estetickou součást města. Rozlišení vegetace od městské zástavby je obecně velmi složité. Vegetace v průběhu roku mění svoje vlastnosti, zbarvení, padání listů, město tvoří směs spektrálních charakteristik a struktur, při rozlišení rostlin, jak bylo zmíněno, se často pracuje s jejich spektrální odrazivostí.

Vegetace má tři základní pásma odrazivosti podle [5].

- oblast pigmentační absorpce: 0,4 – 0,7 μm
- pásmo vysoké odrazivosti: 0,7 – 1,3 μm
- oblast vodní absorpce: 1,3 – 3,0 μm

Oblast pigmentační absorpce

V listech rostlin závisí pigmentační absorpce převážně na obsahu chlorofylu, který pohlcuje oblast modrého a červeného světla a odráží zelené vlnové délky. V této části spektra je odrazivost listů malá. Další vliv mají pigmentační látky karoten a xantofyl, obě dvě látky bývají žlutým pigmentem a mají absorpční pás v modré oblasti. Projeví se při stárnutí listů, kdy ubývá chlorofylu. Tyto pigmenty jsou příčinou žlutého zbarvení listů na podzim. Čtvrtým důležitým pigmentem je antokyan, který je červeným barvivem a zodpovídá za červené zbarvení listů.

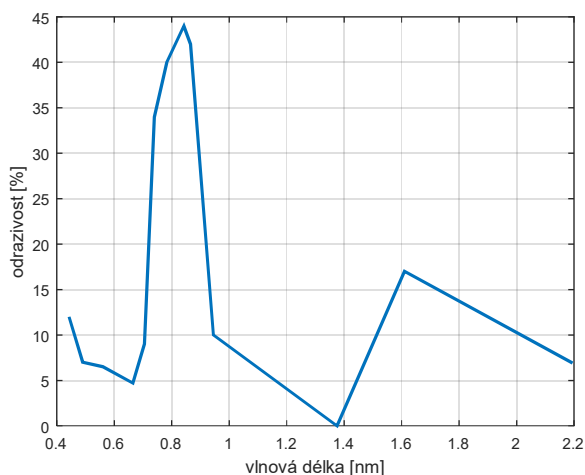
Pásmo vysoké odrazivosti

V infračervené části spektra listy rostlin odrážejí velké množství záření, vysoká odrazivost je dána především morfologickou strukturou listu.

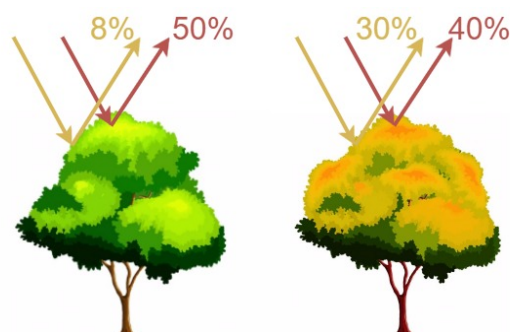
Oblast vodní absorpce

V této oblasti je odrazivost formována převážně absorpčními pásy vody. Voda má absorpční pásy nejvíce na vlnových délkách 1,4 μm , 1,9 μm a 2,9 μm [5].

Na grafu viz obr. 6.5 je ukázáno, že vegetace absorbuje hodně záření v červené oblasti spektra okolo 700 nm a má velký nárůst odrazivosti v blízké infračervené části spektra. Toho se využívá pro určování množství vegetace indexem VI resp. NVDI. V grafu jsou vyneseny hodnoty odrazivosti pro zelený pixel družice Sentinel-2A.



Obr. 6.5 Průběh odrazivosti pro vegetaci



Obr. 6.6 Změna odrazivosti na stavu vegetace

Na obr. 6.6 žlutá šipka představuje odraz ve viditelné a červená šipka v infračervené části spektra, se stárnutím listů, změnou obsahu pigmentu se mnění odrazivost vegetace. Vegetační index není v průběhu roků stálý z důvodu změny vlastností rostlin. To může být značný problém při analýze množství nebo změny zeleně ve městech. Vegetační index VI je možné spočítat podle vztahu 6.2.

$$VI = NIR - R \quad (6.2)$$

Vztah pracuje s odrazivostí rostlin v červené R a infračervené oblasti spektra NIR , předpokládá se, že rostliny odráží mnoho záření v infračervené a málo v červené části. Pokud budou rostliny obsahovat velké množství chlorofylu, hodnota VI bude velká. Převážně se užívá normovaný vegetační index $NVDI$.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (6.3)$$

Normovaný vegetační index nabývá hodnot od -1 do 1, vegetaci patří nejčastěji hodnoty od 0,2 – 1, vyšší hodnota značí zelenější obrazový bod.

Tab. 6.1 Ukázka možných hodnot NVDI

Druh povrchu	NVDI
Velmi hustá vegetace	0,500
Středně hustá vegetace	0,140
Řídká vegetace	0,090
Holá půda	0,025
Oblačnost	0,002
Sníh a led	-0,046
Voda	-0,257

Poznámka: Tabulka převzata z [1, s. 196]

Mezi další vegetační index patří Enhanced vegetation index EVI .

$$EVI = G \cdot \frac{NIR - R}{NIR + C1 \cdot R - C2 \cdot B + L} \quad (6.4)$$

Kde G je zisk a $C1$, $C2$ a L jsou konstanty, nejčastěji se udávají hodnoty $G = 2,5$, $C1 = 6$, $C2 = 7,5$ a $L = 1$. Modré pásmo B je zde použité ke korekci atmosférických vlivů v červeném pásmu. Na rozdíl od NVDI mohou být hodnoty EVI menší než -1 a větší než 1.

Tyto indexy patří mezi poměrové, mezi ortogonální vegetační indexy patří například transformace Tasseled Cap TCT. U této transformace se nejčastěji využívají první tři komponenty, první komponenta se nazývá Brightness a lze jí dobře využít ve městě ke studiu

zastavěných částí, druhá komponenta je pojmenována Greenness a slouží k pozorování vegetace, třetí komponenta je označena jako Wetness a zde je možné sledovat například povrchovou vlhkost půdy nebo rostlin. Index Greenness G se vypočítá podle následujícího vztahu.

$$G = 0,2789 \cdot B + 0,4733 \cdot G + 0,5599 \cdot NIR + 0,508 \cdot SWIR1 + 0,1982 \cdot SWIR2 \quad (6.5)$$

Nový snímek se získá lineární kombinací těchto pěti pásem (G – viditelné zelené, $SWIR1$ - střední infračervené, $SWIR2$ – střední infračervené¹³), vztah byl původně odvozen podle [40] pro zařízení Landsat MSS, ale je ho možné využít i pro jiná zařízení družic Landsat.

Dále lze vegetační indexy rozdělit na širokopásmové vegetační indexy. Tyto indexy pracují s širšími spektrálními pásmy, sem patří výše zmiňované RVI, VI, NVDI nebo například EVI [1; 5; 25].

Druhá skupina indexů pracuje s užšími spektrálními pásmy, tyto pásma nabízí například družice Sentinel-2, příkladem může být Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index mNDVI705 či modified Red Edge Simple Ratio Index mSR705. Dále existují indexy pro sledování množství pigmentu nebo vody obsažené v listech, přehled nejen vegetačních indexů pro družici Sentinel je na stránkách¹⁴.

6.2.1 Jiné indexy

Normallize Difference Building Index – NDBI

Tento index slouží k identifikaci zastavěných oblastí, kladné hodnoty odpovídají budovám, záporné hodnoty představují ostatní krajinu.

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \quad (6.6)$$

$SWIR$ pásmo se nejčastěji používá v rozsahu okolo 1,55 – 1,75 μm , u družic Sentinel a Landsat to odpovídá pásmu $SWIR1$, index nabývá hodnot z rozsahu $<-1,1>$. Podle [1] některé indexy obsahují podobnou informaci, zde například použití NDBI ve městě dává podobné, ale opačné výsledky jako NVDI. Pokud ve městě nejsou velké vodní plochy a index NVDI se využije pro hodnocení množství zeleně, tak zbytek tvoří zastavěné oblasti a naopak pokud se indexem NDBI sleduje zastavěná plocha, doplňkem je vegetace.

¹³ Pásma $SWIR1$ a $SWIR2$ jsou označena stejně jako v kapitole 3.2 Landsat

¹⁴ <http://www.sentinel-hub.com/apps/wms/wms-parameters/EProducts>

Normalize Difference Water Index –NWDI

Tímto indexem lze velice dobře rozeznat vodní plochy, hodnoty větší než nula značí vodní oblasti.

$$NWDI = \frac{G - NIR}{G + NIR} \quad (6.7)$$

Hodnoty od -1 do 0 představují krajinu bez vegetace nebo bez vodního obsahu, index je také v mezích <-1,1> [41].

6.3 PŘEVOD HODNOT PIXELŮ NA ODRAZIVOST

Výše zmíněné vztahy jsou odvozené pro odrazivost povrchu. Při neznalosti této odrazivosti je alespoň lepší převést hodnoty na odrazivost měřenou na senzoru družice. Také z důvodu, aby hodnoty indexů z různých družic byly přibližně porovnatelné. Taktéž hodnoty v tabulce 6.1 jsou pro index NVDI vypočítány z odrazivosti.

Převod hodnot na odrazivost pro Landsat 7 – 8

Mezi hodnotami pixelů Q_{cal} a odrazivostí $\rho\lambda'$ je lineární převodní vztah.

$$\rho\lambda' = M_p Q_{cal} + A_p \quad [-] \quad (6.8)$$

Kde:

$\rho\lambda'$ odrazivost, měřená na senzoru

M_L multiplikativní konstanta, REFLECTANCE_MULT_BAND_x

A_L aditivní konstanta, REFLECTANCE_ADD_BAND_x

Q_{Cal} kalibrované hodnoty pixelů družicového snímku

Korekce na úhel slunce

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\sin(\theta_{SE})} \quad [-] \quad (6.9)$$

Kde:

$\rho\lambda$ korigovaná odrazivost, měřená na senzoru

$\rho\lambda'$ odrazivost, měřená na senzoru

θ_{SE} sluneční úhel, SUN_ELEVATION

Převod hodnot na odrazivost pro Sentinel-2

U družic Sentinel se hodnoty pouze podělí hodnotou QV uváděnou v souboru označeném jako název celé složky s příponou .xml.

$$\rho\lambda' = \frac{Q_{Cal}}{QV} \quad [-] \quad (6.10)$$

$\rho\lambda'$ odrazivost, měřená na senzoru

QV QUANTIFICATION_VALUE

Q_{Cal} kalibrované hodnoty pixelů družicového snímku

Výpočet odrazivosti ze záře pro družice Landsat 4 – 8

Odrazivost se také může počítat ze záře L_λ dopadající na senzor, v případě družic Landsat 4 – 5 je to jediná možnost a pro výpočet teploty je nejprve potřeba zjistit zář dopadající na senzor.

$$L_\lambda = M_L Q_{Cal} + A_L \quad [W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}] \quad (6.11)$$

Kde:

L_λ zář dopadající na senzor v $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$

M_L multiplikativní konstanta, RADIANCE_MULT_BAND_x

A_L aditivní konstanta, RADIANCE_ADD_BAND_x

Q_{Cal} kalibrované hodnoty pixelů družicového snímku

Vztah 6.11 je pro snímky družice Landsat 7 – 8, pro snímky družice Landsat 4 – 5 je vztah následující.

$$L_\lambda = \frac{L_{MAX\lambda} - L_{MIN\lambda}}{Q_{CalMAX} - Q_{CalMIN}} \cdot (Q_{Cal} - Q_{CalMIN}) - L_{MIN\lambda} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}] \quad (6.12)$$

Kde:

L_λ zář dopadající na senzor v $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$

$L_{MAX\lambda}$ největší možná zář v $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$, RADIANCE_MAXIMUM_BAND_x

$L_{MIN\lambda}$ nejmenší možná zář v $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$, RADIANCE_MINIMUM_BAND_x

Q_{CalMAX} největší možná hodnota pixelu, QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_x

Q_{CalMIN} nejmenší možná hodnota pixelu, QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_x

Q_{Cal} kalibrované hodnoty pixelů družicového snímku

Odrazivost $\rho\lambda$ se vypočítá podle následujícího vztahu.

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN \cdot \sin(\theta_{SE})} \quad [-] \quad (6.13)$$

Kde:

ρ_{λ} korigovaná odrazivost, měřená na senzoru

L_{λ} zář dopadající na senzor v $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$

d vzdálenost Země od Slunce v AU, hodnoty v přílohách*

$ESUN$ sluneční intenzita ozáření v $W/(m^2 \cdot \mu m)$, hodnoty v přílohách*

θ_{SE} sluneční úhel, SUN_ELEVATION

Vyjma hodnot s hvězdičkou, jsou všechny doplňkové hodnoty dodávané se snímky v textovém souboru označeném příponou `_MTL`. Proměnná x značí číslo pásma, vzdálenost Země od Slunce závisí na dni pořízení dat, datum pořízení se převede na Juliánské datum používané převážně v astronomii. V přílohách B v tabulce 3 uvádím hodnoty d pro odpovídající Juliánské datum, $ESUN$ se liší pro jednotlivá pásma a je jiné pro Landsat 4 – 5, Landsat 7 a Landsat 8, hodnoty jsou také uváděné v přílohách B v tabulce 1 a 2.

Pro výpočet vegetačních indexů, až na jednu výjimku, používám odrazivost vypočítanou podle výše zmíněných vztahů [26; 27].

6.4 TEPELNÝ OSTROV MĚSTA

Další vlastnost, kterou je možné na družicových snímcích sledovat, je tepelný ostrov města. Tepelný ostrov je oblast, která má znatelně vyšší teplotu než okolní krajina a je obvykle tvořený městskou aglomerací. Na satelitních snímcích v termálním pásmu je dobře patrné tepelné znečištění městem.

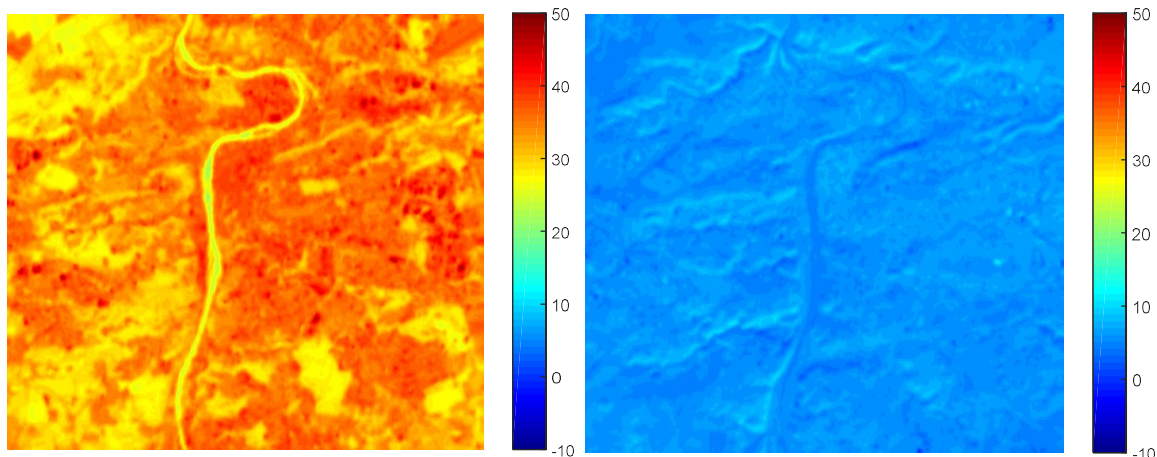
Důvodem je velká akumulace tepla materiálem města, které je tvořené převážně z betonu, cihel či asfaltu. Tyto materiály část slunečního záření pohltí, zvýší svou teplotu (absorbovanou energii přemění převážně na teplo) a poté dojde k opětovnému vyzáření zpět do okolí. Rostliny naproti tomu využívají dopadající energii k fotosyntéze, sluneční záření slouží k tvorbě cukru a kyslíku z oxidu uhličitého a vody. Další důvodem je tvar ulic, které mezi sebou záření odrážejí a vedou. Tento jev se nazývá městský kaňonový efekt (urban canyon effect). Teplotu také zvyšuje odpadní teplo z dopravních prostředků, vytápěných bytů či průmyslu. Rozdíl mezi teplotou vzduchu města a teplotou vzduchu okolí může být až $3^{\circ}C$.

Jev závisí na roční a denní době, v létě bude patrnější než v zimě a také rozdíl krajina, město bude viditelnější v pozdních hodinách než přes den, krajina tvořená zelení vychladne rychleji než město.

Tepelný ostrov má negativní vliv na zdraví lidí a zvířat žijících ve městech, teplé ovzduší ve městě může způsobit úpal, přehřátí organismu, dehydrataci a také zvyšuje cenu za chlazení.

Tepelný ostrov lze potlačit zvýšením množství zeleně ve městech, materiálů, které záření odráží nebo například použitím světlých materiálů.

Problémem při sledování tepelného ostrova může být oblačnost. V podzimních měsících nebo v zimě je často nemožné přes mraky získat obrazové snímky. Teplota jednotlivých snímků je ovlivněna počasím, údaje je nutné kombinovat s pozemním měřením, k úplnému porovnání tepelného ostrova by bylo nutné mít satelitní údaje ještě v době, kdy tento jev nebyl tak výrazný [28]. Tyto dva obrázky ukazují rozložení teploty Prahy v červnu a lednu, teplota je ve stupních Celsia.



Obr. 6.7 Praha 6. června 2015

Obr. 6.8 Praha 13. ledna 2015

Na obrázek v červnu je zřetelně vidět zvýšená teplota oblastí se zástavbou oproti teplotě nezastavěných částí (barevný obrázek viz obr. 6.1). Snímek v lednu je celkově chladnější, tento jev je zde také patrný, ale v daleko menší míře, zde vlivem stejné teplotní stupnice prakticky zanikl.

6.5 VÝPOČET TEPLoty DRUŽICE LANDSAT 4 – 8

Pixely obrázku v termálním pásmu jdou převést na hodnoty teploty. Nejprve se určí zář dopadající na senzor podle vztahu 6.11 nebo 6.12, ze záře se vypočítá teplota T vzorečkem 6.14.

Vypočítaná hodnota je teplota v Kelvinech, pro přepočtení na stupně Celsia se od vypočítané teploty odečte číslo 275.

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1 \cdot \varepsilon}{L_\lambda} + 1\right)} \quad [\text{K}] \quad (6.14)$$

Kde:

T teplota v K

L_λ zář dopadající na senzor v $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$

ε emisivita povrchu, bez znalosti skutečné obvykle nastavena na 0,95

K_1 kalibrační konstanta $K1_CONSTANT_BAND_x$

K_2 kalibrační konstanta $K2_CONSTANT_BAND_x$

Všechny hodnoty jsou obsaženy v textovém souboru společně s dodávanými obrazovými daty a proměnná x opět značí číslo pásma [26; 29].

6.6 PRACHOVÉ ČÁSTICE

S postupným rozrůstáním velikosti města a ubýváním množství zeleně se ve městech zvyšuje koncentrace prachových částic (particulate matter, PM). Zdrojem prachových částic je ve většině případů lidská činnost, například spalování dřeva nebo uhlí, výfukové plyny z dieselových motorů, ale zdrojem může být i požár či výbuch sopky, dalším velkým původcem je také zemědělská činnost. Prachové částice se často dělí na základě velikosti například na PM 1 s velikostí do 1 μm , PM 2,5 s velikostí do 2,5 μm nebo PM 10 s velikostí částic do 10 μm .

Kvalita ovzduší má velký vliv na zdravotní stav obyvatel města. Na satelitních snímcích je možné sledovat koncentraci různých částic, jednou z možností je předpoklad, že odrazivost povrchu ρ_{SURF} je změřena o odrazivost atmosféry ρ_{atm} a na senzoru je změřena odrazivost ρ_{TOA} . Hledá se korelace mezi odrazivostí atmosféry a prachovými částicemi.

Podle článku [42] se může koncentrace částic PM10 vypočítat z odrazivosti atmosféry, odrazivost atmosféry se určí z rozdílu odrazivosti měřené na senzoru družice a z odrazivosti povrchu země.

$$\rho_{atm} = \rho_{TOA} - \rho_{SURF} \quad [-] \quad (6.15)$$

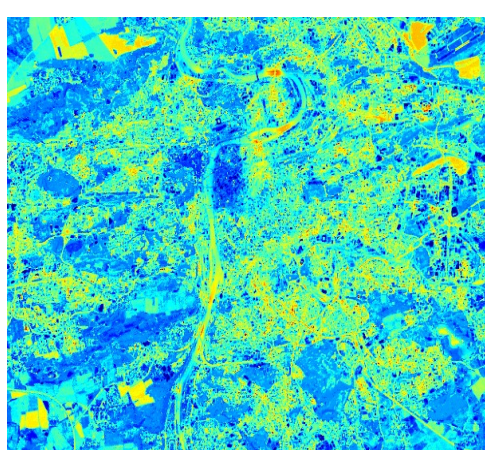
Koncentrace $PM10$ se vypočítá podle následujícího vztahu, kde B , G a R jsou odrazivosti atmosféry, pro modré, zelené a červené viditelné pásma.

$$PM_{10} = 396 \cdot B + 253 \cdot G - 194 \cdot R \quad [\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (6.16)$$

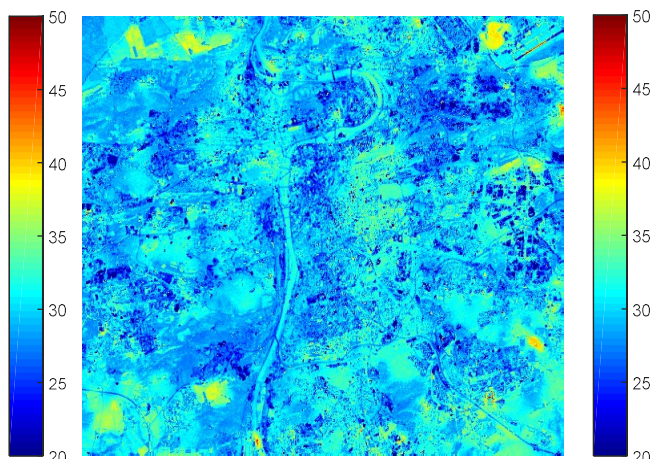
V tomto případě výsledek závisí pouze na použité atmosférické korekci a empiricky odvozeném vztahu 6.16, v článku [42] jsou uvedeny další možné rovnice pro výpočet koncentrace částic. Na satelitních snímcích se nemusí sledovat pouze hodnota prachových částic, může se předpokládat i ovlivnění naměřených hodnot například plyny O_3 , NO_2 nebo vodní párou. Také se nemusí hledat vztah pouze mezi různými plyny nebo částicemi a odrazivostí atmosféry, ale i přímo odrazivostí jednotlivých obrazových bodů, teplotním snímkem nebo rozdílem hodnot odrazivosti dvou po sobě jdoucích snímků v blízkém časovém sledu [32].

Výhodou je na rozdíl od pozemního měření sledování velkého území, problémem je relativně malá četnost snímků. Na pozemních měřicích stanicích se většinou udává průměr koncentrace částic za celý den, což u satelitního snímání není možné [30; 32; 42].

Na následujících obrázcích je ukázka rozložení prachových částic PM_{10} v $\mu\text{m}/\text{g}^2$ vypočítaných podle vztahu 6.15 a 6.16 v červnu a lednu.



Obr. 6.9 Praha 6. června 2015



Obr. 6.10 Praha 13. ledna 2015

6.7 VLASTNÍ ROZBOR

Snímky jsou vybírány s ohledem, aby nebyly zastíněny oblačností. Používaná pásma jsem převedl na odrazivost měřenou na senzoru družice podle vztahů 6.8 – 6.13. Satelitní data pro družice Landsat jsou ze stránek¹⁵ a ze stránek¹⁶ pro družici Sentinel. U metod HPFA, HFA, HFM a DWT bylo použito stejné nastavení jako v části 4.2 **Hodnocení kvality**.

V následující části jsem pracoval pouze s výřezem města Prahy viz obr. 6.1. Horní levý roh obrazu leží na 50,128 zeměpisné šířky a 14,304 zeměpisné délky, pravý dolní roh obrazu odpovídá 50,007 zeměpisné šířky a 14,557 zeměpisné délky. Šířka záběru je 18 km a výška obrazu je 13 km, plocha, kterou zabírá je přibližně 245 km².

6.7.1 Vliv pan-sharpeningu na NVDI

Tab. 6.2 Přehled použitých souborů

Datum	Měsíc	Název
6. červen 2015	6	LC81920252015157LGN00
31. prosinec 2015	12	LC81920252015365LGN00

Poznámka: Oba soubory jsou z družice Landsat 8

Tab. 6.3 Přehled použitých souborů

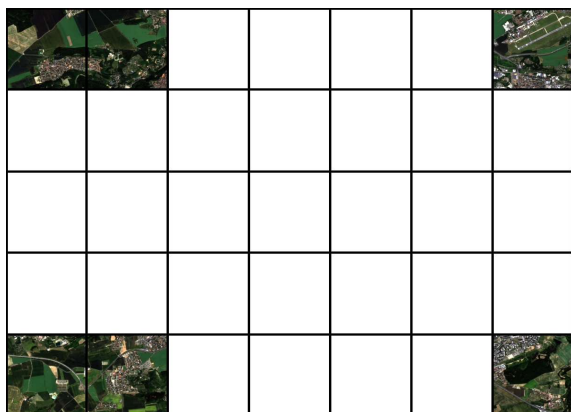
Datum	Měsíc	Název
20. červen 2000	6	LE07_L1TP_192025_20000620_20170211_01_T1
5. leden 2000	1	LE71910252000005NSG01

Poznámka: Oba soubory jsou z družice Landsat 7

Pro sledování změny hodnot NVDI vlivem pan-sharpeningu jsem vybral snímky družice Landsat 7 a Landsat 8 v zimním a letním období. Obraz byl rozdělen do 35 segmentů viz obr. 6.11 a 6.12, velikost jedné oblasti je 181×172 pixelů (2,7×2,6 km), jeden sektor zabírá 7 km². Šest částí nebylo bráno v úvahu (šedě vyznačené oblasti), v těchto prostorách jsou převážně pole. Se zemědělskými oblastmi se obtížně pracuje, a to z důvodu, že často mění svoje vlastnosti od zeleného pokryvu k holé půdě. Oranžový bod je umístění vybraných obrázků obr. 6.13 – 6.14 a obr. 6.17 – 6.18 a obrázků 27 – 54 v přílohách.

¹⁵ <https://earthexplorer.usgs.gov>

¹⁶ <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>



Obr. 6.11 Rozdělení na oblasti

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2							
3							
4							
5							

Obr. 6.12 Označení

Pro porovnání zkreslení vlivem zvýšení prostorového rozlišení je nutné mít referenční snímek s prostorovým rozlišením rovným vylepšenému obrázku. Při zpracování jsem multispektrální a panchromatický snímek dvakrát podvzorkoval stejně jako v případě výpočtu MSE a PSNR, poté se prostorové rozlišení vylepšeného snímku rovnalo prostorovému rozlišení originálnímu multispektrálnímu snímku.

K dispozici jsem měl pro každou družici čtrnáct obrazů. Dva s původním rozlišením a dvanáct se zvýšeným prostorovým rozlišením. U obrazů bylo zvýšené prostorové rozlišení metodami HFM, HFA, HPFA, DWT, Brovey transform a IHS (třetí pásmo pro BT a IHS jsem vybral viditelné zelené).

Všechny obrazy byly nejdříve rozděleny na jednotlivé segmenty, pro každý sektor jsem vypočítal index NVDI. Hodnoty podle tabulky 6.1 větší než 0,5 byly označeny za vegetaci, tato hodnota, i podle mého názoru, přibližně odpovídá skutečnosti viz obr 6.13 a 6.14. Počet zelených pixelů PZ (množství vegetace) byl vypočítán podle následujícího vztahu, počet obrazových bodů s hodnotou $NVDI$ větší než 0,5.

$$PZ = \text{sum}(NVDI(r, nir) > 0,5) \quad [-] \quad (6.17)$$

Kde:

PZ hodnoty vynášené do grafů, (6.15 – 6.16, příloha B: 1 – 22)

r segment viditelného červeného pásma snímku

nir segment blízkého infračerveného pásma snímku



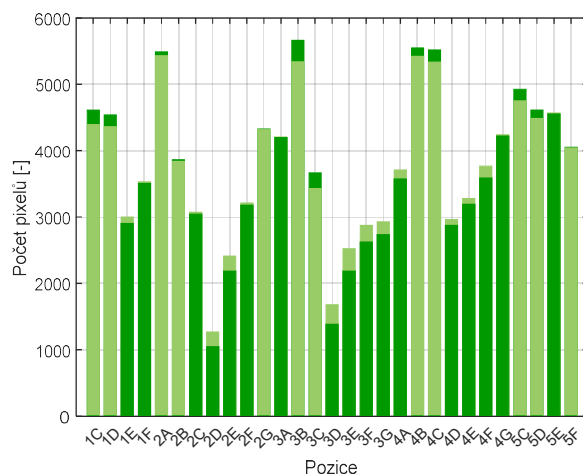
Obr. 6.13 Vybraná část



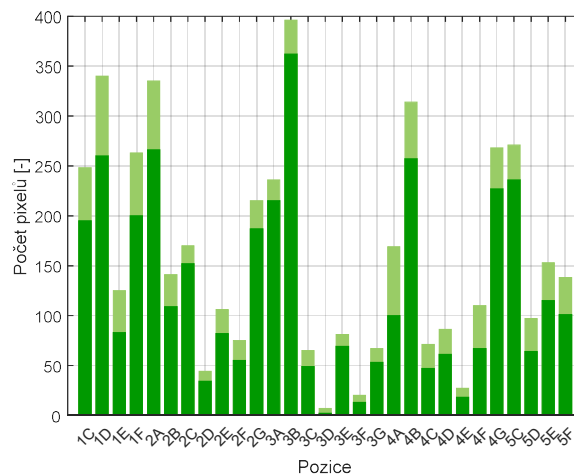
Obr. 6.14 Vyznačení zelených pixelů

Poznámka: RGB obrázek a index NVDI byly počítány zvlášť, zelená plocha je pouze zobrazena na barevný RGB snímek.

Počet zelených pixelů pro vylepšený a původní multispektrální snímek byl vypočítán pro každý segment podle vztahu 6.17 a vyneseno do grafů. Hodnoty pro metodu DWT v létě a HFA v zimě jsou ukázány na grafech 6.15 a 6.16, zbylé grafy jsou v přílohách 1 – 22, tmavě zelenou barvou jsou znázorněné hodnoty vylepšeného snímku a světle zelenou barvou původního snímku. Tyto dvě metody vykazovaly v těchto obdobích nejmenší chybu.



Obr. 6.15 Metoda DWT, léto, Landsat 8



Obr. 6.16 Metoda HFA, zima, Landsat 8

Na grafech můžeme pozorovat, že chyba vychází podobně jak v letním, tak i v zimním období, lépe je podobnost chyby viditelná na grafech v přílohách 23 – 26. Problémem je, že v prosinci je celkový počet zelených pixelů daleko menší, listy rostlin v zimních měsících obsahují daleko méně chlorofylu nebo jsou opadané. V létě je chyba, podle mého názoru,

v podstatě zanedbatelná, například k celkovému počtu 5000 zelených pixelů je chybných pouze 50. V zimě je nutné s touto chybou již počítat. Pokud je v zimě k celkovému počtu 500 pixelů 50 chybných, je to již daleko větší procento, toto je vidět na grafech 6.19 – 6.22.

Pro metody HFM a Brovey transform vycházejí hodnoty PZ po zvýšení prostorového rozlišení totožně, jako na původním nevylepšeném obraze s tím, že jich je 4 krát více (prostorové rozlišení je 60 m a po zvýšení prostorového rozlišení 30 m), z důvodu aplikace násobení pro vylepšení snímku.

$$NVDI = \frac{M_5 \cdot \frac{P}{P_{LPF}} - M_4 \cdot \frac{P}{P_{LPF}}}{M_5 \cdot \frac{P}{P_{LPF}} + M_4 \cdot \frac{P}{P_{LPF}}} = \frac{M_5 - M_4}{M_5 + M_4} \quad [-] \quad (6.18)$$

Kde:

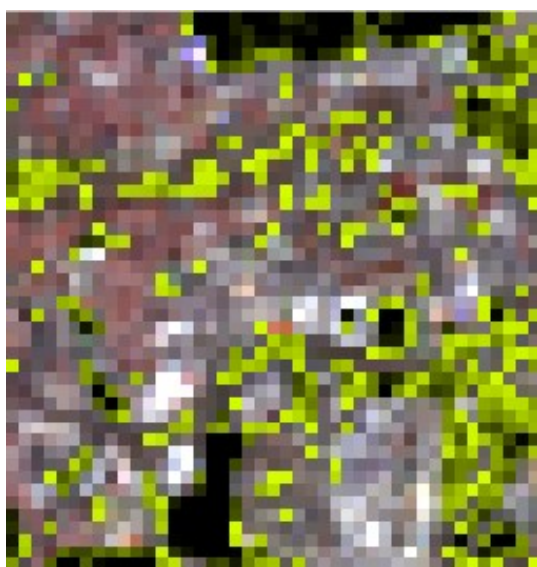
P panchromatický snímek

P_{LPF} nízkofrekvenční snímek získaný filtrací panchromatického dolní propusti

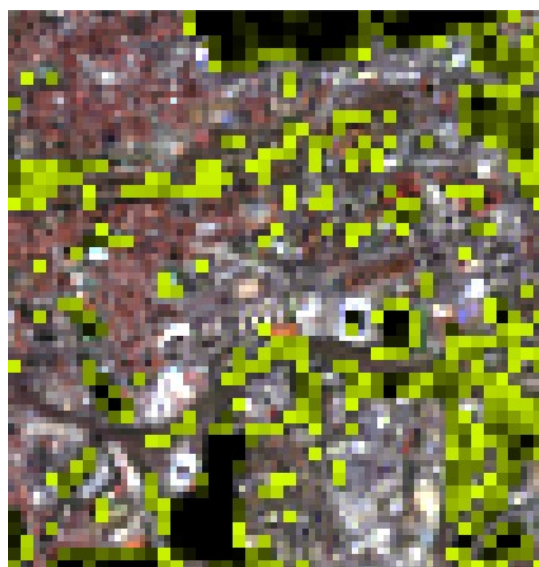
M_4 převzorkované červené pásmo na prostorové rozlišení P snímku

M_5 převzorkované blízké infračerv. pásmo na prostorové rozlišení P snímku

Obdobný vztah je pro BT. Pokud se převzorkování provede tak, že se každý pixel z původního obrazu vloží do nového 4 krát, rozložení zelených pixelů pro původní a vylepšený snímek bude totožné, pouze jich v novém snímku bude 4 krát více. V tomto případě je kvalita dána pouze metodou převzorkování, Tento vliv je vidět i na následujících obrázcích 6.17 a 6.18, rozložení zeleně je zde stejné [43]. Převzorkování bylo provedené výše zmíněnou metodou.



Obr. 6.17 Původní 60 m rozlišení



Obr. 6.18 Vylepšené, 30 m rozlišení

Pro lepší zobrazení je na grafech 6.19 – 6.22 vyznačen průměrný počet rozdílných zelených pixelů v procentech, vypočítaný podle následujících vztahů 6.19 a 6.20, kde RZ je počet rozdílných pixelů jednoho segmentu, vztažený k počtu zelených pixelů PZ_{ref} na referenčním multispektrálním snímku stejného segmentu.

$$RZ = \frac{\text{sum}(NVDI(r, nir) > 0,5) - \text{sum}(NVDI(f_4, f_5) > 0,5)}{PZ_{ref}} \quad (6.19)$$

Následně jsem vypočítal průměrnou hodnotu $RZ_{prům}$ přes jednotlivé segmenty v procentech.

$$RZ_{prům} = abs\left(\frac{1}{29} \sum_{i=1}^{29} RZ_i\right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (6.20)$$

Kde:

$RZ_{prům}$ hodnoty vynášené do grafů v %, (6.19 – 6.22)

RZ počet rozdílných pixelů vztažený k počtu zelených pixelů

PZ_{ref} počet zelených pixelů v jednom segmentu referenčního snímku

r segment viditelného červeného pásma referenčního snímku

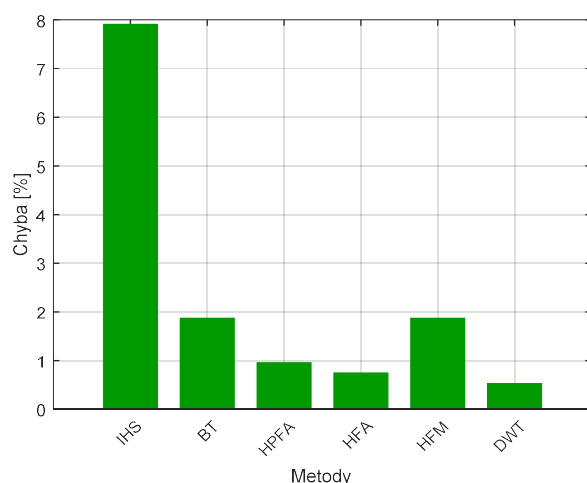
nir segment blízkého infračerveného pásma referenčního snímku

f_4 segment viditelného červeného pásma vylepšeného snímku

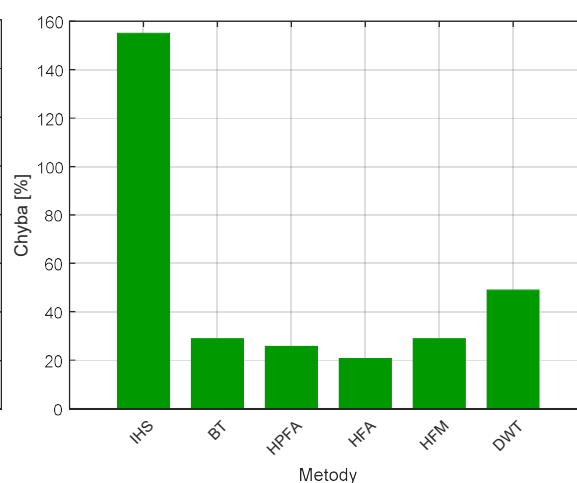
f_5 segment blízkého infračerveného pásma vylepšeného snímku

i pořadí segmentů od C1 do F5 (vyjma šedě označených oblastí)

Na grafech 6.19 a 6.20 je vidět průměrná chyba v procentech pro jednotlivé metody přes rozdělené bloky pro družici Landsat 8.



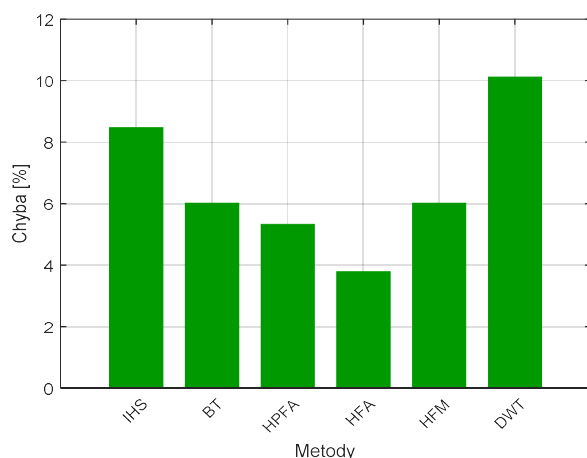
Obr. 6.19 Jednotlivé metody, léto, Landsat 8



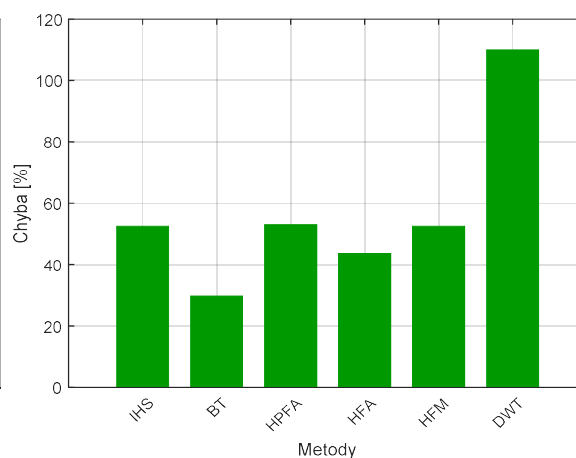
Obr. 6.20 Jednotlivé metody, zima, Landsat 8

Nejnižší hodnotu chyby dosáhla metoda DWT v červnu, v prosinci byla nejmenší chyba u metody HFA. Největší chyba byla změřena u metody IHS jak v létě, tak i v zimě. Je zde vidět, že v zimním období může být zvýšením prostorového rozlišení přidáno daleko více pixelů s hodnotou NVDI větší než 0,5, než bylo na snímku původně.

Pro porovnání jsem vytvořil stejné grafy jen se snímky družice Landsat 7, u této družice obsahuje panchromatický snímek pásmo NIR. Z tohoto důvodu jsem si myslel, že by mělo docházet k daleko menšímu zkreslení, což se v tomto případě nepotvrdilo, některé hodnoty vyšly dokonce větší než u družice Landsat 8 viz grafy 6.21 a 6.22.



Obr. 6.21 Jednotlivé metody, léto, Landsat 7



Obr. 6.22 Jednotlivé metody, zima, Landsat 7

Myslím, že dosažená hodnota chyby, hlavně v zimním období, již není nezanedbatelná a při zpracování je s ní nutné počítat. Chyba se také značně mění s různě nastaveným prahem.

V části 6.7.3 jsem zjišťoval množství zeleně na snímku v létě v jednotlivých oblastech města Prahy, velikost vegetace je pouze orientační. Je velice obtížné, bez dalších informací, zjistit skutečné množství zeleně. Zkreslení způsobené metodami HPFA, HFA a DWT pro nastavenou mez 0,5 nezměnilo hodnoty do té míry, aby je nebylo možné použít. Myslím si, že v tomto případě se výpočet může provádět jak na původním, tak i na vylepšeném snímku těmito metodami bez výrazného ovlivnění výsledků a stejně tak v kapitole 6.7.5.

V kapitole 6.7.6 provádím vyhodnocení změny množství vegetace v Praze od roku 1984 do roku 2016, snímky jsem bral z rozsahu červen až srpen. Zde je podle mého názoru daleko větší problém s různými šířkami pásem družic Landsat 4 – 5 Landsat 7 a Landsat 8, než s vlastním zkreslením, pokud se použije pan-sharpening u družic Landsat 7 – 8. Také zde ještě používám indexy EVI a Tasseled Cap, pro které nebylo provedeno hodnocení. Z těchto důvodů jsem v této části prostorové rozlišení nezvyšil.

6.7.2 Vliv pan-sharpeningu na teplotní snímek

Při analýze vlivu pan-sharpeningu na teplotní snímek jsem používal stejné rozdělení na podoblasti jako v předchozím případě, ale hodnocení jsem prováděl pouze s daty družice Landsat 8. Pro IHS a Brovey transform jsou potřeba tři pásma, bylo nutné vybrat další dvě pásma, které mohou značně ovlivnit výsledek. Z tohoto důvodu jsem vyhodnocení prováděl pouze pro metody HPFA, HFA, HFM a DWT.

Pro zjištění velikosti zkreslení jsem vypočítal průměrnou teplotu segmentu před $t_{prům}$ a po zvýšení prostorového rozlišení $T_{prům}$.

$$t_{prům} = mean(t) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6.21)$$

$$T_{prům} = mean(T) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6.22)$$

Kde:

$t_{prům}, T_{prům}$ hodnoty vynášené do grafů v $^{\circ}\text{C}$, (6.23 a 6.25, příloha B: 55, 57, 59, 61, 63 a 65)

t segment původního teplotního snímku v $^{\circ}\text{C}$

T segment vylepšeného teplotního snímku v $^{\circ}\text{C}$

Teplota byla počítána ze vztahu 6.14 z pásma TIRS 1 ($10,6 \mu\text{m} - 11,19 \mu\text{m}$).

Do grafů 6.23 a 6.25 jsou vynášeny světle červenou barvou hodnoty pro původní snímek a tmavě červenou hodnoty pro vylepšený snímek. Vzhledem k velmi malé odlišnosti průměrných teplot jsou rozdíly málo viditelné, a proto je dále do grafů 6.24 a 6.26 vynesena pouze rozdíl průměrných teplot jednotlivých segmentů T_{roz} .

$$T_{roz} = abs(mean(t) - mean(T)) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6.23)$$

Kde:

T_{roz} hodnoty vynášené do grafů v $^{\circ}\text{C}$, (6.24 a 6.26, příloha B: 56, 58, 60, 62, 64 a 66)

Hodnoty chyby T_{roz} v grafech jsem zkusil seřadit podle rozdílu záře $L_{roz\lambda}$ jednotlivých segmentů od největší po nejmenší. Provedl jsem stejný výpočet jako v předešlém případě, pouze místo teploty jsem počítal rozdíl průměrné záře segmentu podvzorkovaného ¹⁷ panchromatického snímku $mean(p_{\lambda})$ a segmentu původního teplotního snímku $mean(t_{\lambda})$.

$$L_{roz\lambda} = mean(p_{\lambda}) - mean(t_{\lambda}) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}] \quad (6.24)$$

¹⁷ na velikost teplotního snímku

Kde:

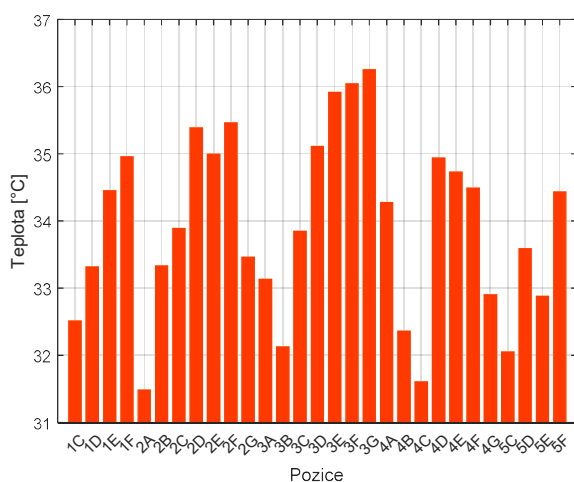
$L_{roz\lambda}$ hodnoty pro seřazení chyby v $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$

t_λ segment snímku záře původního teplotního obrázku v $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$

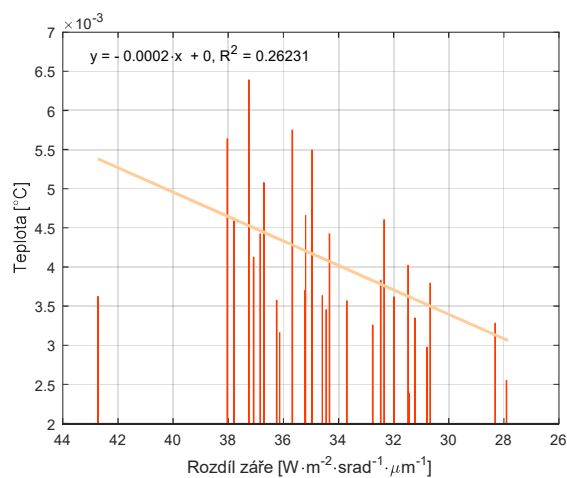
p_λ segment snímku záře podvzorkovaného panchromatického obrázku v $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$

Zář byla počítána ze vztahu 6.11 z pásma TIRS 1 a z panchromatického snímku.

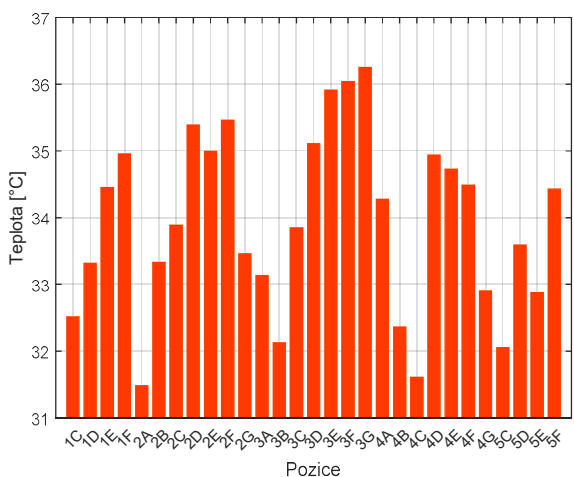
Metoda HPFA vytvářela nejmenší zkreslení a metoda HFM zkreslení největší, pro ostatní metody jsou grafy v přílohách 55 – 66.



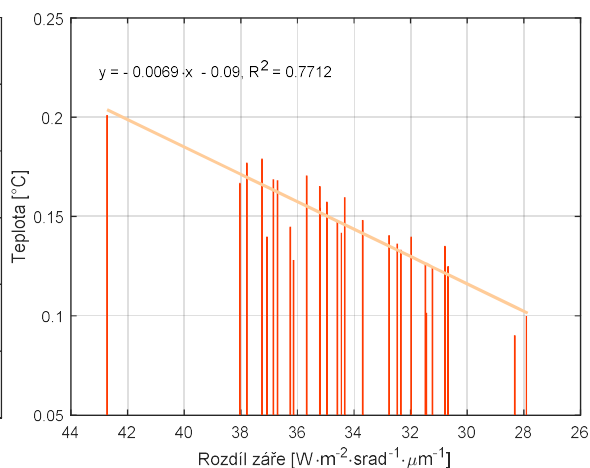
Obr. 6.23 Metoda HPFA, léto



Obr. 6.24 Metoda HPFA, léto, rozdíl hodnot



Obr. 6.25 Metoda HFM, léto



Obr. 6.26 Metoda HFM, léto, rozdíl hodnot

Poznámka: Křivky představují lineární aproximaci hodnot, koeficient R^2 je vypočítán podle vztahu ze stránek https://www.mathworks.com/help/matlab/data_analysis/linear-regression.html

Po seřazení hodnot chyby v grafech 6.24 a 6.26 a v přílohách 56, 58, 60, 62, 64 a 66 podle rozdílu záře (od největší po nejmenší) se ukázalo, že ve všech případech chyba klesá se

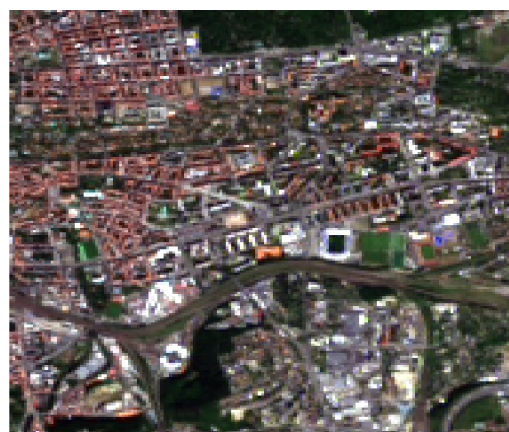
zmenšujícím se rozdílem průměrných zářích panchromatického a původního teplotního snímku. Důvodem může být, že pan-sharpening (alespoň s těmito metodami) funguje nejlépe pro plochy, které mají podobné vyzařovací vlastnosti. Pokud plocha produkuje velkou zář, jak v panchromatickém, tak i tepelném snímku, chyba je malá. Pokud jsou záře v jednotlivých pásmech velmi rozdílné, dochází k velkému zkreslení.

Při srovnání těchto grafů a grafů 55 – 66 v přílohách vytváří největší zkreslení metoda HFM. Nejmenšího zkreslení bylo dosaženo při použití metody HPFA. Zkreslení je v řádu 10^{-3} , což je podle mého názoru v podstatě při takovémto zpracování zanedbatelné. Zároveň použití vyššího prostorového rozlišení u tepelných snímků umožňuje daleko pohodlnější práci a lepší orientaci ve zpracovávaných oblastech. Z toho důvodu byly následující výpočty prováděny na vylepšených snímcích metodou HPFA.

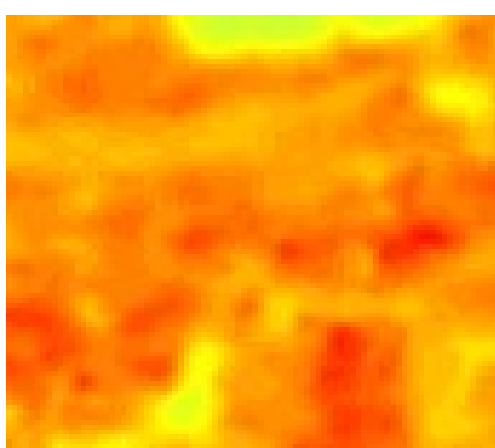
Na obrázcích 6.27 – 6.32 je ukázka vlivu zvýšení prostorového rozlišení na tepelný snímek metodou HFM. Jsou zde patrné body s daleko vyšší nebo nižší hodnotou teploty než v původním obraze. Největší zkreslení odpovídá částem, které vykazují podle mého názoru výrazně odlišné spektrální vlastnosti v obou pásmech. Tyto body mají vyšší nebo nižší teplotu než je v původním tepelném snímku. Myslím si, že jsou to ve většině případů bílé střechy. Ve viditelné části spektra odrážejí velké množství záření. Naopak v tepelné části jsou chladné nebo vyzařují daleko méně. Na snímcích tyto objekty představují například střechy stadionů, obchodních center či průmyslových hal, které mohou být vyrobené z plechu z důvodu menší hmotnosti. V Panchromatickém pásmu je zář těchto pixelů velká a naopak v termálním pásmu mají tyto obrazové body hodnotu záře daleko menší, rozdíl těchto hodnot je velký a toto podle grafů 6.24 a 6.26 odpovídá největší chybě. Obrázky pro ostatní metody jsou umístěné opět v přílohách 67 - 72.



Obr. 6.27 Panchromatický snímek



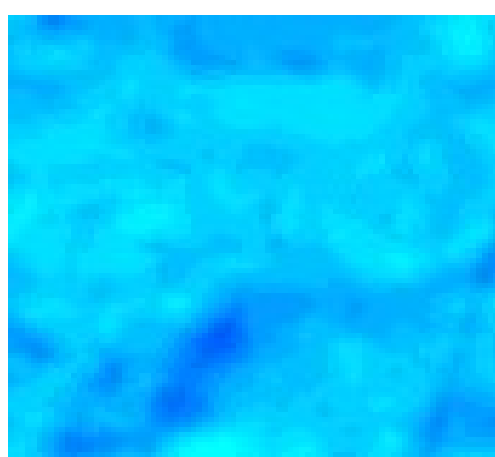
Obr. 6.28 RGB snímek



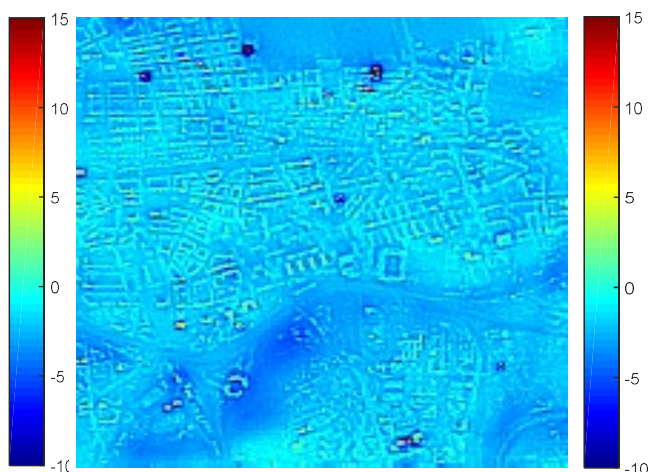
Obr. 6.29 Původní snímek v létě



Obr. 6.30 Vylepšený snímek v létě



Obr. 6.31 Původní snímek v zimě



Obr. 6.32 Vylepšený snímek v zimě

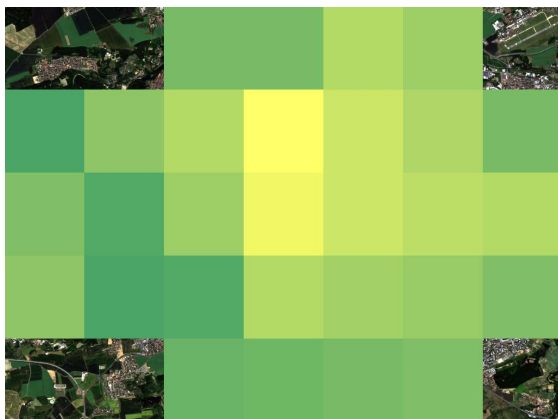
6.7.3 Teplotní proměna města Prahy

Tab. 6.4 Přehled použitých souborů

Datum	Měsíc	Název
13. ledna 2015	1	LC81920252015013LGN00
7. února 2015	2	LC81910252015038LGN00
18. března 2015	3	LC81920252015077LGN00
19. dubna 2015	4	LC81920252015109LGN00
6. červen 2015	6	LC81920252015157LGN00
17. červenec 2015	7	LC81910252015198LGN00
12. říjen 2015	10	LC81920252015285LGN00
31. prosinec 2015	12	LC81920252015365LGN00

Poznámka: Soubory jsou z družice Landsat 8

Velikost, umístění a rozdělení obrazu na oblasti bylo stejné jako při analýze pan-sharpeningu. V jednotlivých segmentech je zobrazené množství zeleně: v levém obrázku odstiny zelené a v pravém obrázku v procentech. Hodnoty jsou pouze orientační, ale i při jiných hodnotách trend zůstává stejný. Množství zeleně, jsem vypočítal na snímku v červnu vztahem 6.30.



Obr. 6.33 Rozdělení na oblasti

	A	B	C	D	E	F	G
1			57	56	39	45	
2	70	49	40	16	32	41	56
3	54	69	45	22	32	37	38
4	49	71	68	39	43	49	55
5			61	58	57	54	

Obr. 6.34 Označení a množství zeleně

U teplotního snímku jsem zvýšil prostorové rozlišení metodou HPFA a pro jednotlivé segmenty byla vypočítána průměrná teplota $t_{prům}$ (opět z pásma TIRS 1).

$$t_{prům} = mean(t_{měsíc}) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6.25)$$

Kde:

$t_{prům}$ hodnoty vynášené do grafů v $^{\circ}\text{C}$, (6.35 a 6.37)

$t_{měsíc}$ segment teplotního snímku v daném dni v $^{\circ}\text{C}$

V grafu 6.35 je zobrazena průměrná hodnota $t_{prům}$ pro jednotlivé segmenty a dny, které jsou označené různými barvami. Obrázek 6.36 ukazuje průměrnou teplotu oblasti $T_{prům}$ za celý rok (za 8 dní reprezentující jednotlivé měsíce).

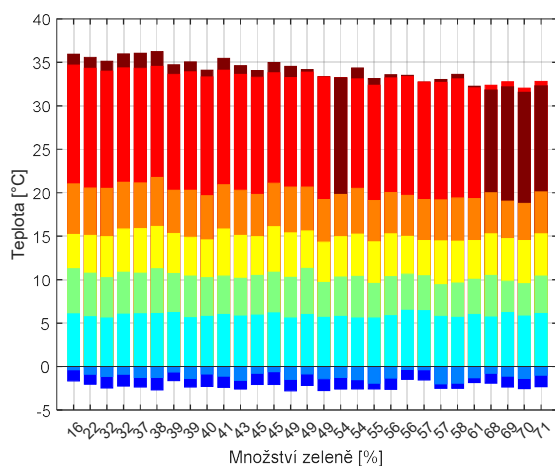
$$T_{prům} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_6 + t_7 + t_{10} + t_{12}}{8} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6.26)$$

Kde:

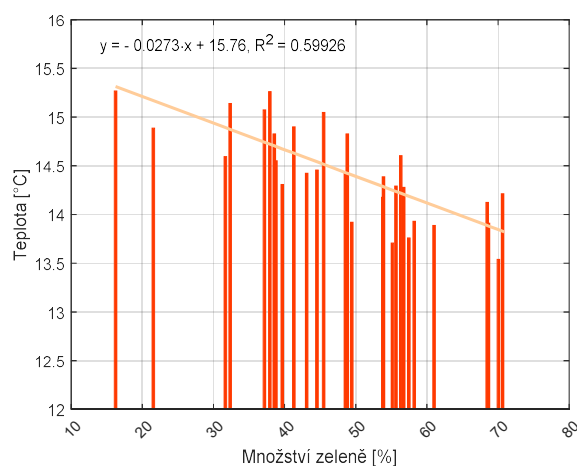
$T_{prům}$ hodnoty vynášené do grafu v $^{\circ}\text{C}$, (6.36)

t_n průměrná teplota jednoho segmentu pro jednotlivé dny v $^{\circ}\text{C}$

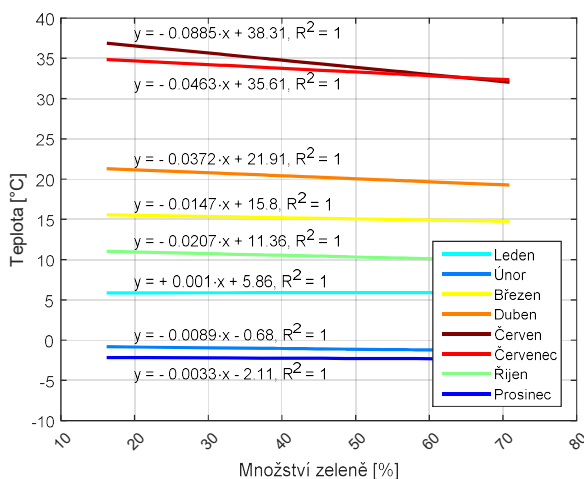
Hodnoty v grafu 6.35 a 6.36 jsou seřazeny od nejmenší hodnoty zeleně po největší, na grafech 6.36 a 6.37 je množství zeleně vyneseno na lineární ose.



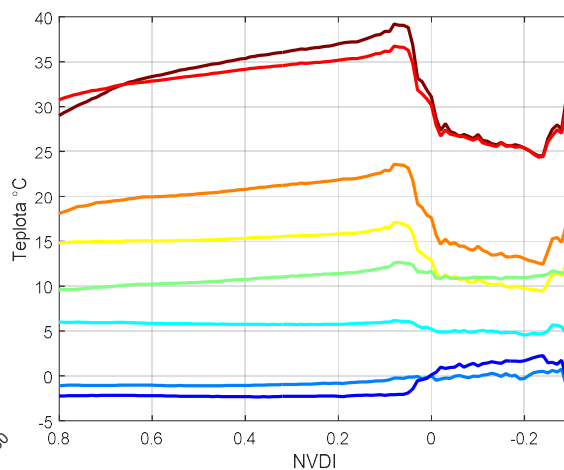
Obr. 6.35 Průměrné teploty pro oblasti



Obr. 6.36 Celková průměrná teplota



Obr. 6.37 Sklon křivek



Obr. 6.38 Závislost teploty na NDVI

Hlavně na obrázku 6.36 je viditelný pokles teploty pro oblasti s větším procentem zeleně. Na grafu 6.37 je lineární aproximace hodnot z grafu 6.35. Ve sledovaných obdobích, vyjma

13. ledna, klesala teplota směrem k oblastem s vyšším procentem zeleně. Pokles je znatelnější směrem k vyšším teplotám. Tento jev je patrný i na grafu 6.38. Zde je závislost NVDI na teplotě. Se vzrůstající hodnotou NVDI klesá teplota. Záporným hodnotám NVDI odpovídají vodní plochy, to způsobuje pokles teploty pro hodnoty menší než nula.

Hodnotu NVDI jsem vypočítal pro snímek v červnu. V tomto období je vegetace nejlépe rozeznatelná. Prostorové rozlišení bylo zvýšené metodou DWT (u teplotního snímku bylo zvýšené prostorové rozlišení metodou HPFA). Poté jsem pro rozsah hodnot NVDI 0,01 (například od 0,59 do 0,6 či od 0,6 do 0,61) vypočítal průměrnou teplotu pixelů, kterým odpovídaly hodnoty NVDI z tohoto rozsahu. Vyhodnocení jsem provedl pro všechny snímky, opět jsou zde znázorněné jednotlivé měsíce (dny) různými barvami.

Z grafů je viditelné, že oblasti s vyšší hodnotou NVDI, případně s hodnotou zeleně, vykazují nižší teplotu. S ubývající vegetací stoupá teplota povrchu. To odpovídá myšlence, že rostliny energii ze slunečního záření spotřebovávají na odpar vody a fotosyntézu a materiál města přeměňuje záření převážně na teplo, které je zpětně vyzářeno do okolí. V grafech v přílohách 81 – 84 je srovnání sklonu křivek a závislosti teploty na NVDI s nevytvořenými snímky.

6.7.4 Koncentrace částic PM10 v Praze

Tab. 6.5 Přehled použitých souborů

Datum	Měsíc	Název
13. ledna 2015	1	LC81920252015013-SC20170324201925
7. února 2015	2	LC81910252015038-SC20170331122843
18. března 2015	3	LC81920252015077-SC20170324204008
19. dubna 2015	4	LC81920252015109-SC20170324202953
6. červen 2015	6	LC81920252015157-SC20170324203946
17. červenec 2015	7	LC81910262015198-SC20170324210229
12. říjen 2015	10	LC81920252015285-SC20170324201826
31. prosinec 2015	12	LC81920252015365-SC20170324203932

Poznámka: Soubory jsou z družice Landsat 8, tyto soubory jsou již korigovány o atmosférické vlivy a převedeny na odrazivost povrchu od <https://earthexplorer.usgs.gov>

V této části jsem pracoval se stejnými soubory a obraz byl rozdělen na stejné úseky jako v předešlé části. V jednotlivých segmentech jsem nepočítal průměrnou teplotu, ale koncentraci částic PM10. Výpočet jsem prováděl podle vztahu 6.15 kde ρ_{TOA} je odrazivost měřená na senzoru družice (soubory z tabulky 6.4) a ρ_{SURF} je odrazivost povrchu (soubory z tabulky 6.5). Koncentrace částic byla vypočítána podle vztahu 6.16. Při výpočtu nebylo zvýšeno prostorové rozlišení z důvodu, že v korigovaných souborech z tabulky 6.5 není dodáván panchromatický snímek.

Pro každý celý snímek (bez šedě vyznačených oblastí viz. obr. 6.34) byla vypočítána průměrná koncentrace částic $PM10_{celk}$.

$$PM10_{celk} = mean(PM10_{měsíc}) \quad [\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (6.27)$$

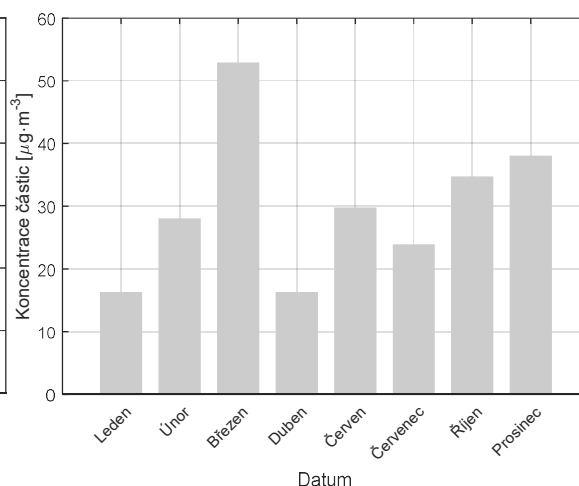
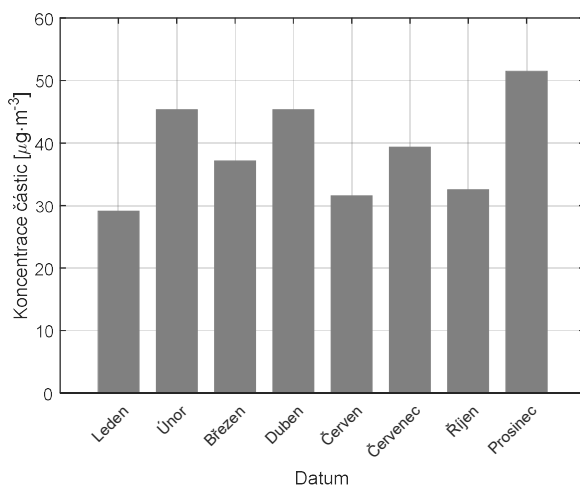
Kde:

$PM10_{celk}$ hodnoty vynášené do grafu v $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (6.39)

$PM10_{měsíc}$ celý snímek koncentrace částic v daném dni v $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Na následujících dvou grafech 6.39 a 6.40 je srovnání průměrné hodnoty koncentrace částic celého snímku $PM10_{celk}$ s daty z měřicích stanic. Zde je, bohužel, vidět, že hodnoty neodpovídají zjištěným výsledkům. Rozsah množství koncentrace částic od 20 do 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ je přibližně správný, ale neodpovídají přímo koncentrace částic v jednotlivých dnech. Důvodem může být, že na měřicích stanicích je udávána průměrná hodnota za celý den, ale družice získá výsledek jen v době přeletu a je těžké posoudit správnost hodnot. K úplnému ověření by bylo

nutné mít hodnoty přesně v době přeletu družice. Nad Prahou přelétá družice Landsat 8 kolem 10 hodin dopoledne a s velkou pravděpodobností se hodnoty budou během dne měnit, například v závislosti na hustotě provozu, topné aktivitě či počasí. Velký vliv může mít také lokálnost měřících stanic.



Obr. 6.39 Vypočítaná průměrná koncentrace

Obr. 6.40 Zjištěná průměrná koncentrace¹⁸

V přílohách viz obr. 73 – 78 jsou uvedené grafy ještě pro jiné modely podle článku [42]. I přesto jsem pro jednotlivé segmenty vypočítal průměrnou koncentraci částic $pm10_{prům}$.

$$pm10_{prům} = mean(pm10_{měsíc}) \quad [\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (6.28)$$

Kde:

$pm10_{prům}$ hodnoty vynášené do grafu v $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (6.41, příloha B: 79)

$pm10_{měsíc}$ segment snímku koncentrace částic v daném dni v $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Výsledky pro jednotlivé dny a oblasti jsem umístil do příloh viz graf 79. Graf 6.41 ukazuje lineární aproximaci získaných hodnot. V grafu 6.42 je zobrazena průměrná hodnota pro celý rok $PM10_{prům}$, vypočítaná podle vztahu 6.29.

$$PM10_{prům} = \frac{pm10_1 + pm10_2 + pm10_3 + pm10_4 + pm10_6 + pm10_7 + pm10_{10} + pm10_{12}}{8} \quad [\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (6.29)$$

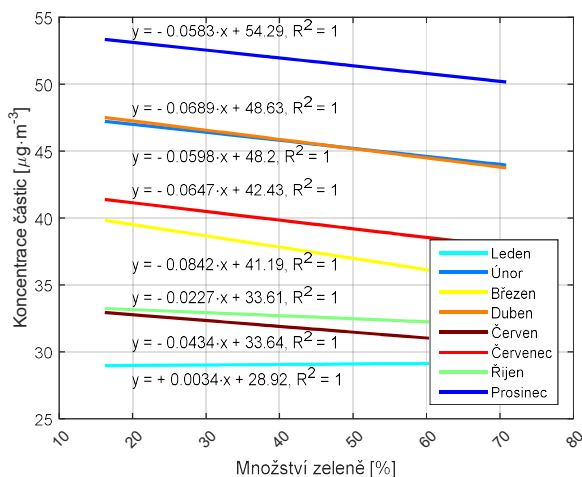
¹⁸ Hodnoty jsou ze stránek http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab_roc/2015_enh/pollution_overview/overview_PM10_CZ.html, v grafu je zobrazena průměrná hodnota z dostupných stanic na území Prahy pro jednotlivé dny

Kde:

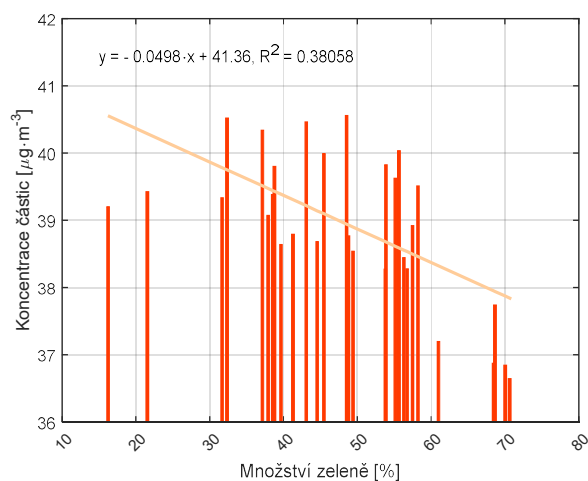
$PM10_{prům}$ hodnoty vynášené do grafu v $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (6.42)

$pm10_n$ průměrná koncentrace částic jednoho segmentu pro jednotlivé dny v $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Hodnoty jsou opět srovnané od nejnižší hodnoty zeleně po největší.



Obr. 6.41 Sklon křivek



Obr. 6.42 Celková průměrná koncentrace

Také zde je opět viditelný pokles koncentrace prachových částic pro oblasti s větším procentem zeleně. Vyjma období ledna, kdy není skoro žádný nárůst ani pokles. Důvodem může být, že vegetace neprodukuje prachové částice a také vysoké stromy mohou sloužit k zachytávání prachových částic, zamezují, aby se dostaly do vzduchu. Ale myslím si, že zde je velkým problémem nejednoznačnost výsledku, zda jsou získané hodnoty správné z důvodu rozdílu oproti měřícím stanicím. V přílohách je také graf závislosti $PM10$ na hodnotách NVDI, graf byl počítán stejně, jako v předešlém případě viz obr. 80.

6.7.5 Změna indexu NVDI v průběhu roku

Tab. 6.6 Přehled použitých souborů

Datum	Měsíc	Název
13. ledna 2015	1	LC81920252015013LGN00
7. února 2015	2	LC81910252015038LGN00
18. března 2015	3	LC81920252015077LGN00
19. dubna 2015	4	LC81920252015109LGN00
6. červen 2015	6	LC81920252015157LGN00
17. červenec 2015	7	LC81910252015198LGN00
12. říjen 2015	10	LC81920252015285LGN00
31. prosinec 2015	12	LC81920252015365LGN00

Poznámka: Soubory jsou z družice Landsat 8

Tab. 6.7 Přehled použitých souborů

Datum	Měsíc	Název
31. prosince 2015	12	S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC _20151231T175836_R022 V20151231T102248_20151231T102248
17. březen 2016	3a	S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC _20160317T152912_R122 V20160317T100011_20160317T100011
27. březen 2016	3b	S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC _20160330T143522_R122 V20160327T100012_20160327T100012
9. květen 2016	5	S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC _20160510T002033_R022 V20160509T101645_20160509T101645
8. červen 2016	6	S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC _20160608T210959_R022 V20160608T101220_20160608T101220
7. červenec 2016	7	S2A_OPER_PRD_MSIL1C PDMC_20160714T091311_R022 _V20160708T101602_20160708T101602
4. srpen 2016	8a	S2A_OPER_PRD_MSIL1C PDMC_20160806T055109_R122 V20160804T100613_20160804T100613
27. srpen 2016	8b	S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC _20160828T210754_R022 V20160827T101022_20160827T101025
13. září 2016	9	S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC _20160915T151344_R122 V20160913T100022_20160913T100504

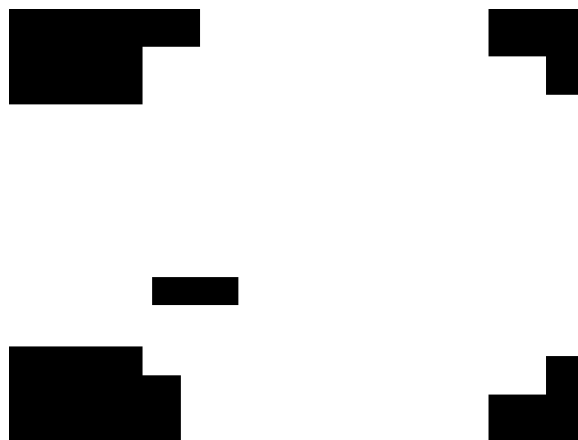
Poznámka: Soubory jsou z družice Sentinel-2A

Pro sledování změny indexu NVDI jsem zvolil roky 2015 a 2016. Hodnocení jsem prováděl na datech z družice Landsat 8 a družice Sentinel-2A, vybraná oblast Prahy byla stejná jako v předchozích případech viz obr. 6.43. U družice Landsat 8 jsem prostorové rozlišení nezvýšil. Dále jsem se snažil maskou odstranit pole na okrajích Prahy a v Prokopském údolí. Tyto části

jsou problematické z důvodu, že nemění svoje vlastnosti vlivem ročního období, ale lidské činnosti.



Obr. 6.43 Sledována oblast

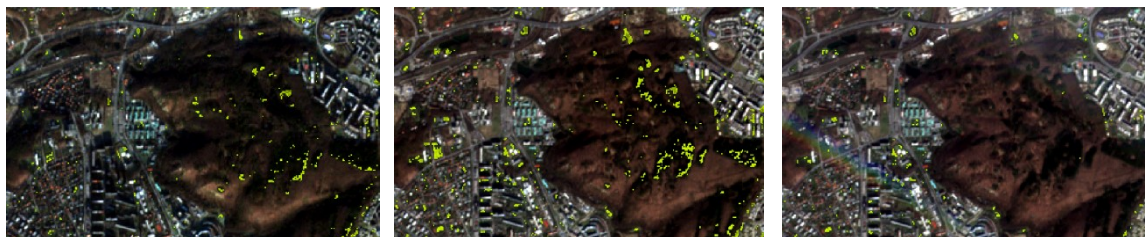


Obr. 6.44 Použitá maska

Hodnota NVDI pro jednotlivé pixely nebude po celý rok stejná. Mění se v závislosti na stavu vegetace. V mírném pásmu bude změna tvořena převážně padáním listů na podzim a žloutnutím trávy vlivem sucha nebo změnou teploty v zimních měsících.

Na následujících devíti obrázcích 6.45 – 6.53 je ukázka změny indexu NVDI v průběhu roku. Hodnoty NVDI jsou převedeny do odstínů zelené. Tmavě zelená barva představuje největší hodnoty, světlejší barva značí nižší hodnotu NVDI. Za minimální hodnotu byl zvolen práh 0,5. Pixely s hodnotou NVDI větší než 0,5 byly brány jako vegetace a označeny zelenou barvou. Obrazové body s nižší hodnotou byly nahrazeny RGB snímkem, obrázky jsou z družice Sentinel.

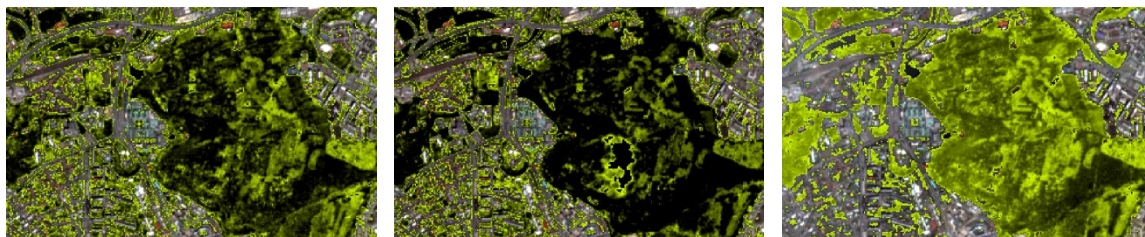
Je zde vidět, že v našem podnebním pásmu tento index nejlépe funguje na jaře a v létě. V tomto období listy obsahují nejvíce chlorofylu. Na zimních snímcích je vegetace zabarvena od hnědé po oranžovou, stromy a tráva byly jen obtížně rozeznány.



Obr. 6.45 31. prosince 2015

Obr. 6.46 17. březen 2016

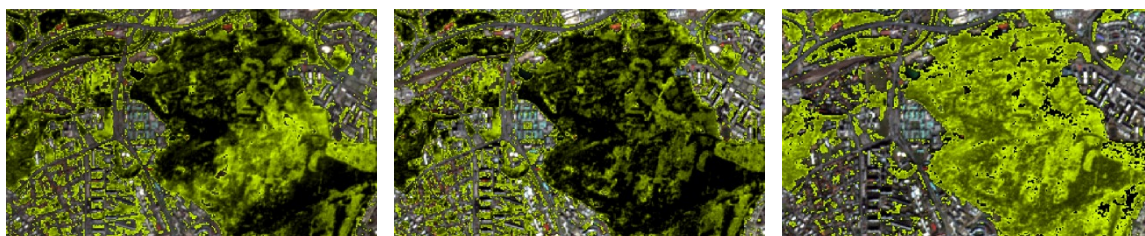
Obr. 6.47 27. březen 2016



Obr. 6.48 9. květen 2016

Obr. 6.49 8. červen 2016

Obr. 6.50 7. červenec 2016



Obr. 6.51 4. srpen 2016

Obr. 6.52 27. srpen 2016

Obr. 6.53 13. září 2016

Pro data z obou družic jsem spočítal počet obrazových bodů s hodnotou *NVDI* větší než 0,5 stejně jako v části 6.7.1. Celkový počet bodů byl vynásoben prostorovým rozlišením a převeden na velikost území *S* v m².

$$S = \text{sum}(NVDI(R, NIR) > 0,5) \cdot SR \quad [\text{m}^2] \quad (6.30)$$

Kde:

S hodnoty vynášené do grafů, převedeny na km², (6.54 a 6.55)

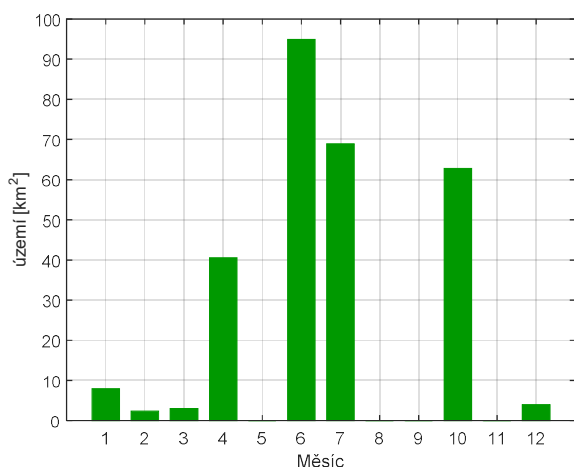
R viditelné červené pásmo pro celý snímek

NIR blízké infračervené pásmo pro celý snímek

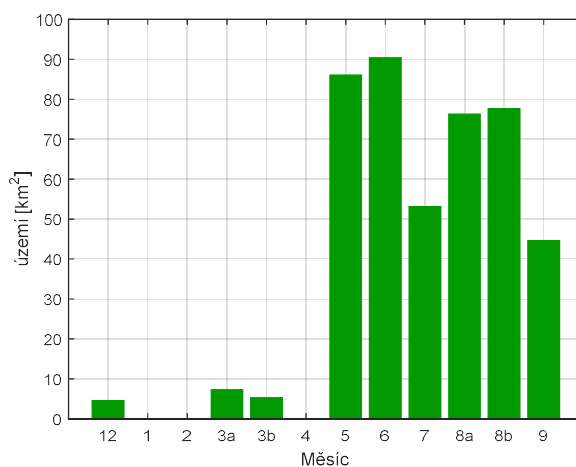
SR prostorové rozlišení jednoho obrazového bodu v m²

Pro družici Sentinel-2A je prostorové rozlišení jednoho pixelu 100 m² (10×10 m) a u družice Landsat 8 bez zvýšení prostorového rozlišení je *SR* = 900 m² (30×30 m). Na následujících dvou grafech je vyneseno poměr zeleně. Množství zeleně bylo hodnoceno na celém snímku viz obr 6.42 s maskou viz obr. 6.43. Velikost vegetace je pouze informativní, protože záleží na prahu,

jaké hodnoty NVDI budou brány ještě jako zeleň. To co zůstává při různé volbě prahu, je průběh hodnot. Nejvyšší plocha zeleně je na jaře a v létě a nejmenší v zimních obdobích.



Obr. 6.54 družice Landsat 8



Obr. 6.55 družice Sentinel-2A

Nejvyšší nárůst nastává v květnu a červnu. V období, kdy je dostatek vláhy, rostliny kvetou. Zároveň nejsou ještě velká horka, aby porost začal vysychat. Vysychání rostlin je patrné nejvíce v červenci. Nepatrný nárůst může nastat na konci srpna, kdy teploty mohou klesat. Poté následuje opět snížení množství až na minimum. Tohoto poznatku jsem využil následně při hodnocení změny vegetace v Praze od roku 1984 – 2016. Snažil jsem se používat snímky převážně v období června. V přílohách je porovnání grafu 6.54 s grafem pro hodnoty získané na vylepšeném snímku družice Landsat 8 metodou DWT viz obr. 86.

6.7.6 Změna zalesnění v Praze od roku 1984 do 2016

Tab. 6.8 Přehled použitých souborů

Datum	Měsíc	Název
11. červenec 1984	7	LT51910251984193XXX12
15. červen 1986	6	LT51910251986166AAA08
5.červenec1988	7	LT41920251988187XXX05
2. červen 1993	6	LT05_L1TP_191025_19930602_20170118_01_T1
14. červenec 1994	7	LT05_L1TP_192025_19940714_20170113_01_T1
10. srpen 1998	8	LT05_L1TP_192025_19980810_20161223_01_T1
20. červen 2000	6	LE07_L1TP_192025_20000620_20170211_01_T1
18. červen 2002	6	LT05_L1TP_192025_20020618_20161208_01_T1
18. červenec 2004	7	LT05_L1TP_191025_20040718_20161201_01_T1
29. srpen 2005	8	LT05_L1TP_192025_20050829_20161124_01_T1
13. červen 2006	6	LT05_L1TP_192025_20060613_20161121_01_T1
25. červen 2007	6	LT05_L1TP_191025_20070625_20161112_01_T1
14. červen 2009	6	LT05_L1TP_191025_20090614_20161025_01_T1
17. červen 2010	6	LT05_L1TP_191025_20100617_20161015_01_T1
4. červen 2011	6	LT51910252011155KIS01
12. srpen 2013	8	LC81910252013224LGN00
6. červen 2015	6	LC81920252015157LGN00
8. červen 2016	6	LC81920252016160LGN00

Poznámka: Soubory s předponou LT05 neboLT5 jsou z družice Landsat 5, s předponou LT4 z družice Landsat 4, s předponou LE07 z družice Landsat 7 a s předponou LC8 z družice Landsat 8

Tab. 6.9 Přehled použitých souborů

Datum	Měsíc	Název
11. červenec 1984	7	LT51910251984193-SC20170324185830
15. červen 1986	6	LT51910251986166-SC20170324185811
5. červenec 1988	7	LT41920251988187-SC20170324185723
2. červen 1993	6	LT51910251993153-SC20170324185707
14. červenec 1994	7	LT51920251994195-SC20170324185829
10. srpen 1998	8	LT51920251998222-SC20170324185738
20. červen 2000	6	LE71920252000172-SC20170324185640
18. červen 2002	6	LT51920252002169-SC20170324185553
18. červenec 2004	7	LT51910252004200-SC20170324185911
29. srpen 2005	8	LT51920252005241-SC20170324185729
13. červen 2006	6	LT51920252006164-SC20170324185538
25. červen 2007	6	LT51910252007176-SC20170324185659
14. červen 2009	6	LT51910252009165-SC20170324185824
17. červen 2010	6	LT51910252010168-SC20170324185522
4. červen 2011	6	LT51910252011155-SC2017032418570
12. srpen 2013	8	LC81910252013224-SC20170324202506
6. červen 2015	6	LC81920252015157-SC20170324203946
8. červen 2016	6	LC81920252016160-SC20170324202817

Poznámka: Soubory s předponou LT5 jsou z družice Landsat 5, s předponou LT4 z družice Landsat 4, s předponou LE7 z družice Landsat 7 a s předponou LC8 z družice Landsat 8, tyto soubory jsou již korigovány o atmosférické vlivy a převedeny na odrazivost povrchu od <https://earthexplorer.usgs.gov>

Hodnocení bylo prováděno na stejném výřezu, jako v předchozím případě viz obr. 6.43 a 6.44. U družice Landsat 7 a Landsat 8 nebylo zvýšeno prostorové rozlišení. Pro každý rok jsem měl sérii snímků z letního období a z nich jsem pro hodnocení vybral ten s největším procentem zeleně, z toho důvodu jsou některé snímky z období srpna. Pro určení zelené plochy S byl použit stejný vztah jako v předchozím případě.

$$S = \text{sum}(NVDI(R, NIR) > 0,5) \cdot SR \quad [\text{m}^2] \quad (6.31)$$

Kde:

S hodnoty vynášené do grafů v m^2 , (6.56, 6.57, 6.60 a 6.61)

Pro původní prostorové rozlišení družice Landsat 4 – 8 je $SR = 900 \text{ m}^2$ ($30 \times 30 \text{ m}$).

Pro index EVI a index Greenness jsem upravil hranici, aby si bylo množství zeleně v prvním sledovaném roce 1984 pro různé indexy přibližně podobné.

$$S = \text{sum}(EVI(B, R, NIR, K) > 0,37) \cdot SR \quad [\text{m}^2] \quad (6.32)$$

Kde:

S hodnoty vynášené do grafu v m^2 , (6.58)

B viditelné modré pásmo pro celý snímek

K konstanty ($G = 2,5$, $C1 = 6$, $C2 = 7,5$ a $L = 1$)

A pro Greenness G jsem nastavil mez na hodnot 0,065.

$$S = \text{sum}(G(B, G, R, NIR, SWIR1, SWIR2) > 0,065) \cdot SR \quad [\text{m}^2] \quad (6.33)$$

Kde:

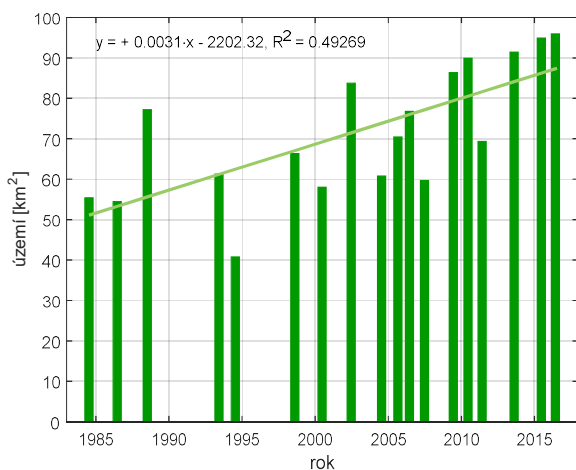
S hodnoty vynášené do grafu v m^2 , (6.59)

$SWIR1$ střední infračervené pásmo pro celý snímek

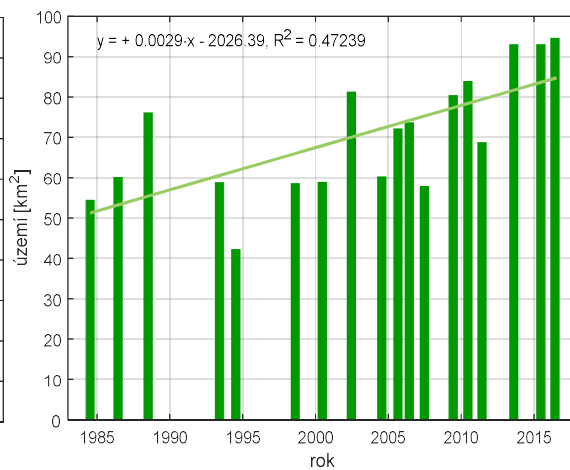
$SWIR2$ střední infračervené pásmo pro celý snímek¹⁹

Na grafech 6.56 – 6.60 jsou získané výsledky. Ve všech případech vyšlo, že množství zeleně v Praze od roku 1984 narůstá. Graf 6.60 podle mého názoru ukazuje nejsprávnější hodnotu, v tomto případě je index NVDI počítán z odrazivosti povrchu (z dat tab. 6.9), dále nebyly brány hodnoty z družice Landsat 7 (rok 2000) a Landsat 8 (roky 2013, 2015 a 2016). Obě družice mají trochu odlišné rozsahy spektrálních pásem. I na grafech je patrné, že vypočítané hodnoty pro poslední tři roky družice Landsat 8 jsou znatelně vyšší. Ale i po odebrání těchto údajů vyšly hodnoty narůstající. Ve všech případech je diskutabilní velikost nárůstu zeleně, která závisí na zvolené hranici. U indexu NVDI jsem zkoušel měnit mez od hodnoty 0,2 do 0,8, v každém případě vyšlo narůstající množství zeleně, pouze se měnil sklon křivky. Pro hodnotu 0,2 vyšel nárůst nejmenší, protože bylo bráno i spousta obrazových bodů, které již patřily zástavbě a nejvyšší nárůst vychází okolo nastavené hodnoty 0,7.

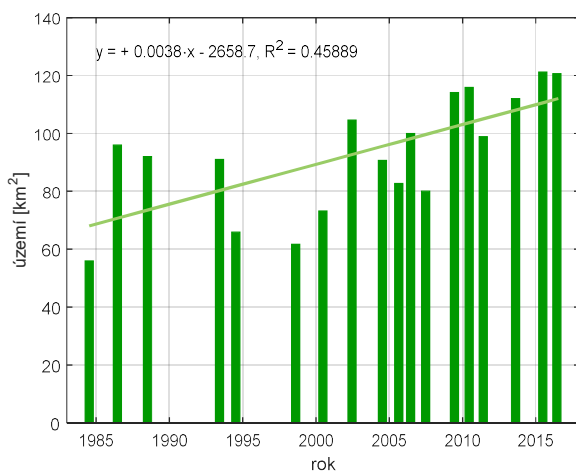
¹⁹ označení je stejné jako v kapitole 3.2 Landsat



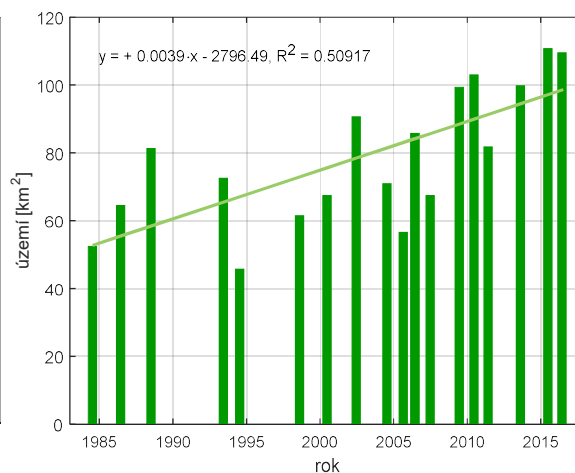
Obr. 6.56 index NVDI



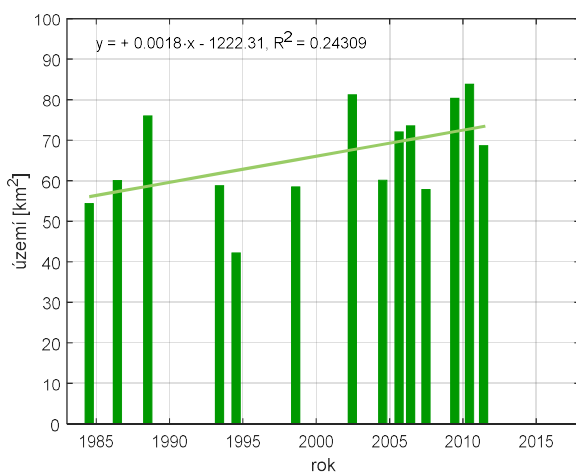
Obr. 6.57 index NVDI²⁰



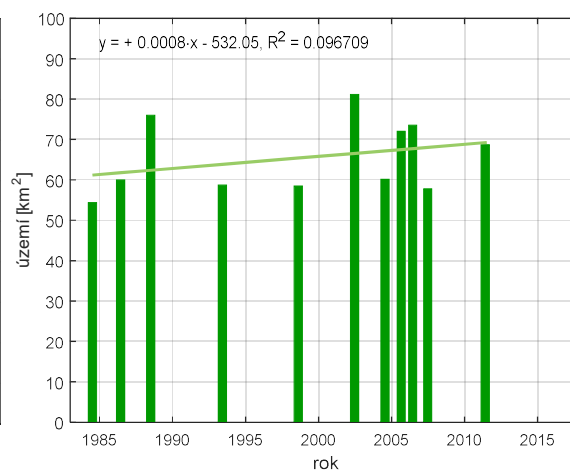
Obr. 6.58 index EVI



Obr. 6.59 index Greeness



Obr. 6.60 index NVDI²¹



Obr. 6.61 index NVDI²²

²⁰ Index NVDI počítaný z odrazivosti povrchu

²¹ Index NVDI počítaný z odrazivosti povrchu bez hodnot družice Landsat 7 a Landsat 8

²² Index NVDI počítaný z odrazivosti povrchu bez hodnot družice Landsat 7 a Landsat 8 a roků 1994, 2009 a 2010

Na grafech v 6.62 – 6.64 jsou vyobrazené srážky a teploty před dobou pořízení dat. Teplotu a množství srážek, jsem sledoval z důvodu, aby nedošlo k ovlivnění hodnot například nadměrnými srážkami nebo vysokou teplotou. Při hodnocení množství zelené plochy jsou vegetační indexy velice citlivé na aktuální stav vegetace.

Na grafu 6.62 jsou modrou barvou označeny hodnoty, kdy byly od 1. ledna do doby pořízení dat nadprůměrné srážky²³. Červovou barvou jsou ohraničeny hodnoty, kdy byla nadprůměrná teplota za stejné časové období²⁴. Graf 6.63 zobrazuje maximální teplotu 30 dní před přeletem družice (průměrná hodnota ze stanice Libuš a ze stanice Ruzyň), hodnoty jsou seřazeny od největší po nejmenší teplotu²⁵. Graf 6.64 zobrazuje množství spadných srážek dva měsíce před pořízením dat, hodnoty jsou také srovnané od nejmenšího množství srážek po největší²⁶. Údaje o počasí jsou zobrazeny na množství zeleně získané indexem NVDI z odrazivosti povrchu.

Na grafu 6.62 světle zelená čára představuje průměrnou hodnotu zeleně, vyskytují se zde čtyři červeně ohraničené roky jak s nadprůměrným, tak i podprůměrným množstvím zeleně. Možné nadhodnocení mohou způsobovat roky 2009 a 2010, kdy spadly nadprůměrné srážky. Dále rok 1994, který i podle grafu 6.63 měl největší průměrnou teplotu, ale i po odebrání těchto hodnot vyjde množství zeleně stále narůstající viz obr. 6.61.

Dále na grafech 6.63 a 6.64 nejsou jednoznačně rozděleny hodnoty před, ani po roce 2000. Nevychází, že by období před rokem 2000 byla všechna velmi teplá a období po roce 2000 všechna studená. Stejně tak je to i se srážkami. Zároveň je zde vidět, že s klesající teplotou a se zvětšujícím se množstvím srážek plocha zeleně roste. Zde již světle zelená čára opět představuje lineární aproximaci množství zelené plochy. Je zde vidět velký vliv počasí na hodnotu NVDI.

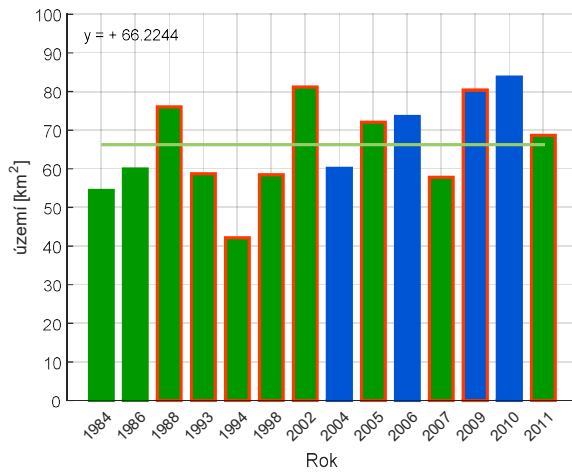
Z těchto důvodů si myslím, že příčinou rostoucích hodnot na grafech 6.56 – 6.61 by neměly být špatně vybrané snímky, ať už pro příznivý nebo nepříznivý vliv počasí.

²³ Hodnoty jsou ze stránek <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-srazky>

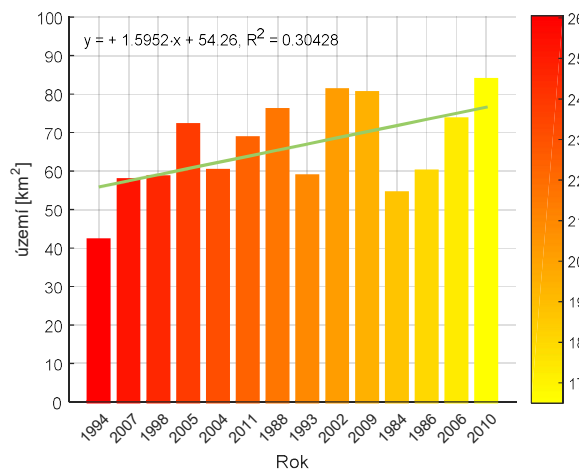
²⁴ Hodnoty jsou ze stránek <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-teploty>

²⁵ Hodnoty jsou ze stanice http://www.in-pocasi.cz/archiv/stanice.php?stanice=praha_libus a ze stanice http://www.in-pocasi.cz/archiv/stanice.php?stanice=praha_ruzyne

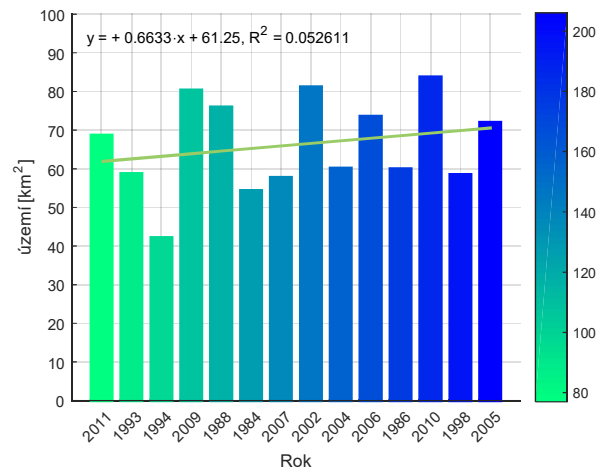
²⁶ Hodnoty jsou také ze stránek <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-srazky>



Obr. 6.62 Označení nadprůměrných teplot a srážek



Obr. 6.63 Teplota



Obr. 6.64 Množství srážek

7 Závěr

V práci jsem v první části popisoval vybrané metody pro zvýšení prostorového rozlišení satelitních obrazových dat a poté jsem provedl zhodnocení účinnosti zvýšení prostorového rozlišení jak z hlediska spektrálního zkreslení, tak i přidání detailů. Z provedeného hodnocení vyšla nejlépe metoda IHS, u které musí být vstupem tři pásma. Nejlepší metoda pracující pouze s jedním pásmem byla DWT. U metody DWT jsem nechal nastavení vytvořené tvůrci a u metod HPFA, HFA a HMF jsem použil pro každou metodu pouze jeden typ filtru. Zde si myslím, že je velký prostor pro další výzkum, neboť jde tyto metody hodnotit i z hlediska různého nastavení. Dále jsem sledoval vliv pan-sharpeningu na index NVDI a na teplotní snímek. U vlivu pan-sharpeningu na NVDI a způsobu hodnocení, které jsem zvolil, závisí výsledek velice na stavu vegetace, na době pořízení dat a také na hodnotě zvolené hranice pro prahování. Myslím si, že u družice Landsat 8 v letním období neovlivňoval pan-sharpening získané výsledky do té míry (snad kromě metody IHS), aby nešly použít. Ale zde hodně záleží na účelu použití, například pokud se po zvýšení prostorového rozlišení použije neřízená klasifikace, mohou být výsledky úplně jiné. Podle mého názoru zajímavý výsledek vyšel u vlivu pan-sharpeningu na teplotní snímek. Chyba při použití metody HPFA mezi průměrnou teplotou části snímku před a po zvýšení prostorového rozlišení vyšla v řádu tisícin. Vylepšené teplotní snímky mají 15 m rozlišení a již jsou na nich vidět jednotlivé budovy. To může být užitečné například při sledování teplotní bilance ulic či domů.

V druhé části jsem zkoumal vliv množství zeleně na teplotu města. Výsledky vyšly podle předpokladu. Oblasti s vyšším procentem zeleně byly chladnější. Tento jev je patrný i na relativně velkém území o rozloze 7 km². Také závislost NVDI na teplotě vyšla podle očekávání. Obrazové body s vyššími hodnotami NVDI měly nižší teplotu. Jev byl znatelnější pro teplejší dny například v červnu či červenci. Stejně hodnocení jsem provedl pro koncentraci částic PM10, koncentrace částic vyšla také nižší směrem k vyšším hodnotám zeleně. Zde je problém, že je obtížné ohodnotit správnost vypočítané koncentrace částic bez ověření hodnot s pozemním měřením provedeném v době přeletu družice. Na stanicích je udávána průměrná hodnota za celý den, myslím si, že se tato hodnota může velmi lišit od hodnot získaných pouze v době přeletu družice. Hodnoty změřené na pozemní stanici za 24 hodin vyšly v rozsahu obdobně, ale hodnoty přímo neodpovídaly získaným hodnotám z družice.

Dále jsem pozoroval proměnu hodnot NVDI v průběhu roku 2015 a 2016. Hodnoty na snímcích pořízených v květnu a červnu byly největší, v době, kdy listy rostlin obsahují nejvíce chlorofylu. To odpovídá principu fungování indexu NVDI respektive i EVI a druhé komponentě

transformace Tasseled cap. Pro sledování množství vegetace ve městech je nejlepší využívat snímky pořízené v období letních měsíců.

Při sledování množství zeleně od 1984 – 2016 vychází, že plocha zeleně v Praze narůstá, myslím si, že toto je zajímavý výsledek. Ovšem je velice obtížné ověřit správnost tohoto výstupu. Nenašel jsem žádné informace, které by tento výsledek potvrdily nebo vyvrátily. Podle studie²⁷ neprobíhá žádné ucelené monitorování zeleně města Prahy a informace jsou pouze kusé a nelze tak ověřit správnost výsledku. V sekci počasí jsem se snažil vyvrátit vliv teploty a srážek. Důvodem nárůstu hodnot může být skutečně zlepšující se stav vegetace například lepší péče o zeleň, výsadba nových stromů, již se nestaví tak rozsáhlá sídliště nebo zlepšující se stav ovzduší, což je pro město Prahu jistě pozitivní výsledek.

²⁷ <http://arnika.org/stav-zelene>

8 Použitá literatura

Kniha

- [1] DOBROVOLNÝ, Petr. *Dálkový průzkum Země: digitální zpracování obrazu*. Brno: Masarykova univerzita, 1998. ISBN 80-210-1812-7.
- [2] HALOUNOVÁ, Lena a Karel PAVELKA. *Dálkový průzkum Země*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2008dotisk. ISBN 9788001031247.
- [3] SCHOWENGERDT, Robert A. *Remote sensing, models, and methods for image processing*. 3rd ed. Burlington, MA: Academic Press, c2007. ISBN 0123694078.
- [4] TRAUTH, Martin H., Robin. GEBBERS a Norbert. MARWAN. *MATLAB recipes for earth sciences*. 2nd ed. New York: Springer, c2007. ISBN 978-354-0727-484.

Elektronická kniha

- [5] PLÁNKA, Ladislav. *DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ: MODUL 01 TEORETICKÉ ZÁKLADY* [online]. Brno: VUT Fakulta stavební, 2007 [cit. 2017-02-28]. Dostupné z: http://fast.darmy.net/opory%20-%20IV%20nMgr/HE05_M01-D%C3%A1lkov%C3%BD%20pr%C5%AFzkum%20Zem%C4%9B%20-%20Teorie.pdf
- [6] PLÁNKA, Ladislav. *DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ: MODUL 02 PŘÍSTROJOVÁ TECHNIKA* [online]. Brno: VUT Fakulta stavební, 2007 [cit. 2017-02-28]. Dostupné z: http://fast.darmy.net/opory%20-%20IV%20nMgr/HE05_M02-D%C3%A1lkov%C3%BD%20pr%C5%AFzkum%20Zem%C4%9B%20-%20P%C5%99%C3%ADstrojov%C3%A1%20technika.pdf
- [7] PLÁNKA, Ladislav. *DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ: MODUL 03 Zpracování dat* [online]. Brno: VUT Fakulta stavební, 2007 [cit. 2017-02-28]. Dostupné z: http://fast.darmy.net/opory%20-%20IV%20nMgr/HE05_M03-D%C3%A1lkov%C3%BD%20pr%C5%AFzkum%20Zem%C4%9B%20-%20Zpracov%C3%A1n%C3%AD%20dat.pdf
- [8] PÁLSSON, Frosti. *Pansharpening and Classification of Pansharpened Images* [online]. University of Iceland, 2013 [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/1946/15664>
- [9] DE SHERBININ, Alex, Deborah BALK, Karina YAGER, Malanding JAITEH, Francesca POZZI, Chandra GIRI a Antoinette WANNEBO. *A CIESIN Thematic Guide to Social Science Applications of Remote Sensing* [online]. City of New York: The Trustees of

Columbia University, 2002 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: http://sedac.ciesin.columbia.edu/binaries/web/sedac/thematic-guides/ciesin_ssars_tg.pdf

- [10] NIRUPAMA a Slobodan P. SIMONOVIC. *Role of Remote Sensing in Disaster Management* [online]. London (Ontario): University of Western Ontario, 2012 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <http://ir.lib.uwo.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1002&context=wrrr>

Webové sídlo, internetový portál

- [11] Tutorial: Fundamentals of Remote Sensing. *Natural Resources Canada* [online]. 2016 [cit. 2017-02-28]. Dostupné z: <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/9309>
- [12] *CRISP: Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing* [online]. Singapore: National University of Singapore, 2001 [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: <http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/rsmain.htm>
- [13] *SEOS: Introduction to Remote Sensing* [online]. Germany: University of Oldenburg, 2016 [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: http://lms.seos-project.eu/learning_modules/remotesensing/remotesensing-c00-p01.html
- [14] *Gisat: Přehled družicových systémů* [online]. Praha [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: <http://www.gisat.cz/content/cz/dpz/prehled-druzicovych-systemu>
- [15] *Landsat Science* [online]. NASA, 2017 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- [16] *Sentinel Online* [online]. ESA, 2017 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>
- [17] *Copernicus* [online]. [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <http://copernicus.eu>
- [18] *GEO / COPERNICUS v České Republice* [online]. CENIA, 2016 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <http://copernicus.gov.cz/copernicus>
- [19] *MathWorks: Matlab* [online]. The MathWorks, c1994-2017 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/matlab>

Webová stránka

- [20] Remote Sensing and Lasers. *NASA* [online]. NASA, 2008 [cit. 2017-02-28]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/centers/langley/news/factsheets/RemoteSensing.html>
- [21] Image Types and Formats. *Remote Sensing Image Analysis and Applications* [online]. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, c2017 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <https://www.e-education.psu.edu/geog883/node/503>

- [22] Landsat Missions: Imaging the Earth Since 1972. *USGS* [online]. U.S. Geological Survey, 2016 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <https://landsat.usgs.gov/landsat-missions-timeline>
- [23] Landsat-1 to Landsat-3. *Earth Observation Portal* [online]. ESA, 2017 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/l/landsat-1-3>
- [24] 100 Earth Shattering Remote Sensing Applications & Uses. *GISGeography* [online]. GISGeography.com, 2017 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <http://gisgeography.com/100-earth-remote-sensing-applications-uses/>
- [25] Calculating the Vegetation Indices from Landsat 8 image Using ArcGis 10.1. *GrindGIS* [online]. Grindgis.com, 2016 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <http://grindgis.com/blog/vegetation-indices-arcgis>
- [26] Using the USGS Landsat 8 Product. *USGS* [online]. U.S. Geological Survey, 2012 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <https://landsat.usgs.gov/using-usgs-landsat-8-product>
- [27] A Straight Forward Guide for Processing Radiance and Reflectance for EO-1 ALI, Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, and ASTER. *USGS* [online]. U.S. Geological Survey, 2016 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: https://cegis.usgs.gov/soil_moisture/pdf/A%20Straight%20Forward%20guide%20for%20Processing%20Radiance%20and%20Reflectance_V_24Jul12.pdf
- [28] Tepelný ostrov města Prahy. *IN-POČASÍ* [online]. InMeteo, c2017 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/tepelný-ostrov-prahy-12.8.2015>
- [29] *Converting Landsat ETM+ thermal band to temperature* [online]. [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <http://uwf.edu/zhu/remotesensing/homework/tir/tir.pdf>
- [30] Znečištění venkovního ovzduší prachem (prašný aerosol PM10). *Krajská hygienická stanice Moravskoslezského kraje se sídlem v Ostravě* [online]. Ostrava: Krajská hygienická stanice Moravskoslezského kraje, c2007 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: https://www.khsova.cz/01_aktuality/znecesteni_ovzduši_prachem_2008.php?datum=2008-12-17

Akademická práce

- [31] DEMEL, Jan Využití vlnkové transformace pro fúzi obrazových dat: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství, 2012. 49 s. Vedoucí práce byl Ing. Petr Walek

- [32] HLADKÁ, Anna. *Stanovení míry znečištění atmosféry z družicových dat* [online]. Praha, 2013 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/133210>. Diplomová práce. Karlova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Doc. Ing. Jan Kolář, CSc.

Elektronický článek

- [33] Kidiyo Kpalma, Miloud Chikr El-Mezouar, Nasreddine Taleb. Recent Trends in Satellite Image Pan-sharpening techniques. 1st International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, Jun 2014, Vrniacka Banja, Serbia. <hal-01075703>
- [34] TU, Te-Ming, Shun-Chi SU, Hsuen-Chyun SHYU a Ping S. HUANG. A new look at IHS-like image fusion methods. *Information Fusion* [online]. 2001, 2(3), 177-186 [cit. 2017-05-01]. DOI: 10.1016/S1566-2535(01)00036-7. ISSN 15662535. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1566253501000367>
- [35] NAIDU, V. a J. RAOL. Pixel-level Image Fusion using Wavelets and Principal Component Analysis. *Defence Science Journal* [online]. 2008-5-30, 58(3), 338-352 [cit. 2017-04-29]. DOI: 10.14429/dsj.58.1653. ISSN 0011748x. Dostupné z: <http://publications.drdo.gov.in/ojs/index.php/dsj/article/view/1653>
- [36] AL-WASSAI, Firouz Abdullah, N.V. KALYANKAR a Ali A. AL-ZUKY. *Arithmetic and Frequency Filtering Methods of Pixel-Based Image Fusion Techniques* [online]. 2011, 10 [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1107/1107.3348.pdf>
- [37] NAIDU, VPS. Discrete Cosine Transform based Image Fusion Techniques. *Journal of Communication, Navigation and Signal Processing* [online]. 2012, 2012(Vol. 1, No. 1, pp. 35-45), 11 [cit. 2016-11-14]. Dostupné z: http://nal-ir.nal.res.in/10440/1/7_Discrete_Cosine_Transform_based_Image_Fusion_Techniques.pdf
- [38] PALUBINSKAS, Gintautas. Fast, simple, and good pan-sharpening method. *Journal of Applied Remote Sensing* [online]. 2013, 7(1), 073526- [cit. 2017-05-10]. DOI: 10.1117/1.JRS.7.073526. ISSN 1931-3195. Dostupné z: <http://remotesensing.spiedigitallibrary.org/article.aspx?doi=10.1117/1.JRS.7.073526>
- [39] ANDREOU, Charoula, Vassilia KARATHANASSI a Polychronis KOLOKOUSSIS. Investigation of hyperspectral remote sensing for mapping asphalt road conditions. *International Journal of Remote Sensing* [online]. 2011, 32(21), 6315-6333 [cit. 2017-04-30]. DOI: 10.1080/01431161.2010.508799. ISSN 0143-1161. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431161.2010.508799>

- [40] BAIG, Muhammad Hasan Ali, Lifu ZHANG, Tong SHUAI a Qingxi TONG. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing Letters* [online]. 2014, 5(5), 423-431 [cit. 2017-04-11]. DOI: 10.1080/2150704X.2014.915434. ISSN 2150-704x. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/2150704X.2014.915434>
- [41] HERBEL, Mihai Valentin, Lucian Octavian DRAGOMIR a Silvica ONCIA. *USING SATELLITE IMAGES LANDSAT TM FOR CALCULATING NORMALIZED DIFFERENCE INDEXES FOR THE LANDSCAPE OF PARÂNG MOUNTAINS* [online]. Alba Iulia: University "1 Decembrie 1918", 2012 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/256292540_Normalized_difference_indices
- [42] OTHMAN, Nadzri, Mohd Zubir MAT JAFRI a Lim Hwee SAN. Estimating Particulate Matter Concentration over Arid Region Using Satellite Remote Sensing: A Case Study in Makkah, Saudi Arabia. *Modern Applied Science* [online]. 2010, 4(11), - [cit. 2017-04-30]. DOI: 10.5539/mas.v4n11p131. ISSN 1913-1852. Dostupné z: <http://www.ccsenet.org/journal/index.php/mas/article/view/6363>
- [43] JOHNSON, Brian. Effects of Pansharpening on Vegetation Indices. *ISPRS International Journal of Geo-Information* [online]. 2014, 3(2), 507-522 [cit. 2017-04-10]. DOI: 10.3390/ijgi3020507. ISSN 2220-9964. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2220-9964/3/2/507/>

Obrázky

- [44] FLIGHT STORIES. In: *Historic Wings* [online]. 2016 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <http://fly.historicwings.com/2012/10/first-aerial-photographs-of-a-city>
- [45] First Photo From Space. In: *AIR&SPACE* [online]. [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <http://www.airspacemag.com/space/the-first-photo-from-space-13721411>

Příloha A

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1 Přehled používaných frekvenčních pásem	25
Tab. 3.2 Historický přehled misí	30
Tab. 3.3 Multispectral Scanner, přehled pásem.....	31
Tab. 3.4 Landsat Thematic Mapper, přehled pásem.....	32
Tab. 3.5 Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus, přehled pásem	32
Tab. 3.6 Operational Land Imager a Thermal Infrared Sensor, přehled pásem	33
Tab. 3.7 Sentinel-2, přehled pásem	36
Tab. 4.1 Přehled použitých souborů	51
Tab. 6.1 Ukázka možných hodnot NVDI	69
Tab. 6.2 Přehled použitých souborů	77
Tab. 6.3 Přehled použitých souborů	77
Tab. 6.4 Přehled použitých souborů	87
Tab. 6.5 Přehled použitých souborů	90
Tab. 6.6 Přehled použitých souborů	93
Tab. 6.7 Přehled použitých souborů	93
Tab. 6.8 Přehled použitých souborů	97
Tab. 6.9 Přehled použitých souborů	98
Tab. 1 Sluneční intenzita ozáření (<i>ESUN</i>).....	v
Tab. 2 Sluneční intenzita ozáření (<i>ESUN</i>).....	v
Tab. 3 Juliánské datum a odpovídající vzdálenost (<i>d</i>).....	v
Tab. 4 Změřené hodnoty pro sledované metody.....	xvii
Tab. 5 Změřené hodnoty pro HPFA	xvii
Tab. 6 Změřené hodnoty pro HFA	xvii
Tab. 7 Změřené hodnoty pro HFM.....	xviii
Tab. 8 Změřené hodnoty pro DWT.....	xviii
Tab. 9 Změřené hodnoty pro ImRes.....	xviii

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 A – Absorpce, R – Oraz, T – Přenos.....	4
Obr. 2.2 Zrcadlový a difuzní odraz	4
Obr. 2.3 Přenos atmosférou.....	7
Obr. 2.4 Vzdálenost měřícího senzoru od zkoumaného předmětu	7
Obr. 2.5 Přenos atmosférou a vliv tepelného záření.....	10
Obr. 2.6 Fotografie Bostonu.....	12
Obr. 2.7 První snímek Země z vesmíru.....	12
Obr. 2.8 Pořizování snímků fotoaparátem a kamerou	12
Obr. 2.9 Radiometr	13
Obr. 2.10 Zorné pole.....	14
Obr. 2.11 Mechanický skener	16
Obr. 2.12 Elektrooptický skener	16
Obr. 2.13 SLAR čelní pohled.....	17
Obr. 2.14 Příčné prostorové rozlišení.....	18
Obr. 2.15 SLAR boční pohled.....	19
Obr. 2.16 Boční pohled SAR	19
Obr. 3.1 Prostorové rozlišení snímku 3 kilometry.....	23
Obr. 3.2 Grafický přehled používaných frekvenčních pásem	25
Obr. 3.3 Zobrazení délky trvání jednotlivých misí.....	30
Obr. 3.4 Snímání šesti řádek současně	31
Obr. 4.1 IHS fusion.....	41
Obr. 4.2 PCA method.....	43
Obr. 4.3 High-Pass Filtered Additive method.....	44
Obr. 4.4 DCT based Image Fusion.....	47
Obr. 4.5 Banka filtrů pro první stupeň dekompozice	49

Obr. 4.6 První stupeň dekompozice	49
Obr. 4.7 Druhý stupeň dekompozice.....	49
Obr. 4.8 DWT based Image Fusion.....	50
Obr. 4.9 Hodnoty SSIM _{norm} a CORR.....	55
Obr. 4.10 Hodnoty JQM	55
Obr. 4.11 Hodnoty MSE.....	55
Obr. 4.12 Hodnoty PSNR	55
Obr. 4.13 Hodnoty JQM pro pět vybraných metod a pro různá pásma	57
Obr. 6.1 Sledována oblast	66
Obr. 6.2 K-means clustering s pásmy R a NIR	66
Obr. 6.3 Prahovaný index NVDI.....	66
Obr. 6.4 K-means clustering s 13 pásmy.....	66
Obr. 6.5 Průběh odrazivosti pro vegetaci.....	68
Obr. 6.6 Změna odrazivosti na stavu vegetace.....	68
Obr. 6.7 Praha 6. června 2015.....	74
Obr. 6.8 Praha 13. ledna 2015.....	74
Obr. 6.9 Praha 6. června 2015.....	76
Obr. 6.10 Praha 13. ledna 2015.....	76
Obr. 6.11 Rozdělení na oblasti.....	78
Obr. 6.12 Označení	78
Obr. 6.13 Vybraná část	79
Obr. 6.14 Vyznačení zelených pixelů	79
Obr. 6.15 Metoda DWT, léto, Landsat 8.....	79
Obr. 6.16 Metoda HFA, zima, Landsat 8	79
Obr. 6.17 Původní 60 m rozlišení	80
Obr. 6.18 Vylepšené, 30 m rozlišení	80
Obr. 6.19 Jednotlivé metody, léto, Landsat 8.....	81
Obr. 6.20 Jednotlivé metody, zima, Landsat 8.....	81
Obr. 6.21 Jednotlivé metody, léto, Landsat 7.....	82
Obr. 6.22 Jednotlivé metody, zima, Landsat 7.....	82
Obr. 6.23 Metoda HPFA, léto	84
Obr. 6.24 Metoda HPFA, léto, rozdíl hodnot.....	84
Obr. 6.25 Metoda HFM, léto.....	84
Obr. 6.26 Metoda HFM, léto, rozdíl hodnot.....	84
Obr. 6.27 Panchromatický snímek	86
Obr. 6.28 RGB snímek.....	86
Obr. 6.29 Původní snímek v létě.....	86
Obr. 6.30 Vylepšený snímek v létě	86
Obr. 6.31 Původní snímek v zimě	86
Obr. 6.32 Vylepšený snímek v zimě	86
Obr. 6.33 Rozdělení na oblasti.....	87
Obr. 6.34 Označení a množství zeleně.....	87
Obr. 6.35 Průměrné teploty pro oblasti	88
Obr. 6.36 Celková průměrná teplota	88
Obr. 6.37 Sklon křivek.....	88
Obr. 6.38 Závislost teploty na NVDI	88
Obr. 6.39 Vypočítaná průměrná koncentrace.....	91
Obr. 6.40 Zjištěná průměrná koncentrace	91
Obr. 6.41 Sklon křivek.....	92
Obr. 6.42 Celková průměrná koncentrace.....	92
Obr. 6.43 Sledována oblast	94
Obr. 6.44 Použitá maska	94
Obr. 6.45 31. prosince 2015	95
Obr. 6.46 17. březen 2016.....	95
Obr. 6.47 27. březen 2016.....	95
Obr. 6.48 9. květen 2016.....	95
Obr. 6.49 8. červen 2016.....	95
Obr. 6.50 7. červenec 2016	95
Obr. 6.51 4. srpen 2016.....	95
Obr. 6.52 27. srpen 2016.....	95
Obr. 6.53 13. září 2016	95
Obr. 6.54 družice Landsat 8	96
Obr. 6.55 družice Sentinel-2A	96
Obr. 6.56 index NVDI.....	100

Obr. 6.57 index NVDI	100
Obr. 6.58 index EVI.....	100
Obr. 6.59 index Greeness	100
Obr. 6.60 index NVDI.....	100
Obr. 6.61 index NVDI.....	100
Obr. 6.62 Označení nadprůměrných teplot a srážek.....	102
Obr. 6.63 Teplota	102
Obr. 6.64 Množství srážek	102
Obr. 1 Metoda IHS, léto, Landsat 8	vi
Obr. 2 Metoda IHS, zima, Landsat 8.....	vi
Obr. 3 Metoda BT, léto, Landsat 8.....	vi
Obr. 4 Metoda BT, zima, Landsat 8.....	vi
Obr. 5 Metoda HPFA, léto, Landsat 8.....	vi
Obr. 6 Metoda HPFA, zima, Landsat 8.....	vi
Obr. 7 Metoda HFM, léto, Landsat 8	vii
Obr. 8 Metoda HFM, zima, Landsat 8	vii
Obr. 9 Metoda HFA, léto, Landsat 8.....	vii
Obr. 10 Metoda DWT, zima, Landsat 8.....	vii
Obr. 11 Metoda IHS, léto, Landsat 7	vii
Obr. 12 Metoda IHS, zima, Landsat 7.....	vii
Obr. 13 Metoda BT, léto, Landsat 7.....	vii
Obr. 14 Metoda BT, zima, Landsat 7	vii
Obr. 15 Metoda HPFA, léto, Landsat 7.....	viii
Obr. 16 Metoda HPFA, zima, Landsat 7.....	viii
Obr. 17 Metoda HFA, léto, Landsat 7.....	viii
Obr. 18 Metoda HFA, zima, Landsat 7	viii
Obr. 19 Metoda HFM, léto, Landsat 7	viii
Obr. 20 Metoda HFM, zima, Landsat 7	viii
Obr. 21 Metoda DWT, léto, Landsat 7.....	viii
Obr. 22 Metoda DWT, zima, Landsat 7.....	viii
Obr. 23 Jednotlivé metody, léto, Landsat 8.....	ix
Obr. 24 Jednotlivé metody, zima, Landsat 8.....	ix
Obr. 25 Jednotlivé metody, léto, Landsat 7.....	ix
Obr. 26 Jednotlivé metody, zima, Landsat 7.....	ix
Obr. 27 Ref. léto, Landsat 8	x
Obr. 28 IHS, léto, Landsat 8	x
Obr. 29 BT, léto, Landsat 8.....	x
Obr. 30 HPFA, léto, Landsat 8.....	x
Obr. 31 HFA, léto, Landsat 8.....	x
Obr. 32 HFM, léto, Landsat 8	x
Obr. 33 DWT, léto, Landsat 8.....	x
Obr. 34 Ref. zima, Landsat 8	x
Obr. 35 IHS, zima, Landsat 8.....	x
Obr. 36 BT, zima, Landsat 8	x
Obr. 37 HPFA, zima, Landsat 8	x
Obr. 38 HFA, zima, Landsat 8	x
Obr. 39 HFM, léto, Landsat 8	xi
Obr. 40 DWT, zima, Landsat 8.....	xi
Obr. 41 Ref. léto Landsat 7.....	xi
Obr. 42 IHS, léto, Landsat 7	xi
Obr. 43 BT, léto, Landsat 7.....	xi
Obr. 44 HPFA, léto, Landsat 7.....	xi
Obr. 45 HFA, léto, Landsat 7.....	xi
Obr. 46 HFM, léto, Landsat 7	xi
Obr. 47 DWT, léto, Landsat 7.....	xi
Obr. 48 Ref. zima Landsat 7	xi
Obr. 49 IHS, zima, Landsat 7	xi
Obr. 50 BT, zima, Landsat 7	xi
Obr. 51 HPFA, zima, Landsat 7.....	xii
Obr. 52 HFA, zima, Landsat 7	xii
Obr. 53 HFA, zima, Landsat 7	xii
Obr. 54 DWT, zima, Landsat 7	xii
Obr. 55 Metoda HFA, léto	xii
Obr. 56 Metoda HFA, rozdíl hodnot, léto	xii

Obr. 57 Metoda DWT, léto	xii
Obr. 58 Metoda DWT, rozdíl hodnot, léto	xii
Obr. 59 Metoda HPFA, zima	xiii
Obr. 60 Metoda HPFA, rozdíl hodnot, zima	xiii
Obr. 61 Metoda HFA, zima.....	xiii
Obr. 62 Metoda HFA, rozdíl hodnot, zima	xiii
Obr. 63 Metoda HFM, zima.....	xiii
Obr. 64 Metoda HFM, rozdíl hodnot, zima.....	xiii
Obr. 65 Metoda DWT, zima	xiii
Obr. 66 Metoda DWT, rozdíl hodnot, zima	xiii
Obr. 67 Metoda HPFA, léto	xiv
Obr. 68 Metoda HPFA, zima	xiv
Obr. 69 Metoda HFA, léto	xiv
Obr. 70 Metoda HFA, zima.....	xiv
Obr. 71 Metoda DWT, léto	xiv
Obr. 72 Metoda DWT, zima	xiv
Obr. 73 Zjištěná průměrná koncentrace	xv
Obr. 74 $PM_{10} = 396 \cdot B_{atm} + 256 \cdot G_{atm} - 194 \cdot G_{atm}$	xv
Obr. 75 $PM_{10} = 463 \cdot B_{atm} + 66 \cdot G_{atm}$	xv
Obr. 76 $PM_{10} = 1162 \cdot B_{atm} + 858 \cdot R_{atm}$	xv
Obr. 77 $PM_{10} = 498 \cdot B_{atm} + 15 \cdot R_{atm}$	xv
Obr. 78 $PM_{10} = 748 \cdot B_{atm}^2 + 22052 \cdot B_{atm}$	xv
Obr. 79 Průměrné koncentrace pro oblasti	xv
Obr. 80 Závislost PM_{10} na NVDI	xv
Obr. 81 Původní snímek.....	xvi
Obr. 82 Pan-sharpening.....	xvi
Obr. 83 Původní snímek.....	xvi
Obr. 84 Pan-sharpening.....	xvi
Obr. 85 družice Landsat 8, původní snímek.....	xvi
Obr. 86 družice Landsat 8, pan-sharpening.....	xvi
Obr. 87 Panchromatický snímek	xix
Obr. 88 Původní snímek.....	xix
Obr. 89 IHS.....	xix
Obr. 90 Brovey transform	xix
Obr. 91 DWT	xix
Obr. 92 HFM.....	xix
Obr. 93 HFA	xix
Obr. 94 HPFA	xix
Obr. 95 DCTe	xx
Obr. 96 DCTah.....	xx
Obr. 97 DCTma	xx
Obr. 98 Mean	xx
Obr. 99 MLT.....	xx
Obr. 100 DCTav.....	xx
Obr. 101 PCA	xx

Příloha B

ANALÝZA HLAVNÍHO MĚSTA PRAHY

Tab. 1 Sluneční intenzita ozáření (*ESUN*)

Band	Landsat 4	Landsat 5	Landsat 7
1	1958	1958	1970
2	1826	1827	1842
3	1554	1551	1547
4	1033	1036	1044
5	214,7	214,9	225,7
7	80,70	80,65	1369
8			1369

Poznámka: Číslování je stejné jako v kapitole 3 **Družice**

Zdroj: <https://landsat.usgs.gov/esun>

Tab. 2 Sluneční intenzita ozáření (*ESUN*)

Band	Landsat 8
1	1958
2	1826
3	1554
4	1033
5	214,7
7	80,70
8	

Poznámka: Číslování je stejné jako v kapitole

3 Družice, pro Landsat 8 není na stránkách uvedena hodnota pro panchromatické pásmo

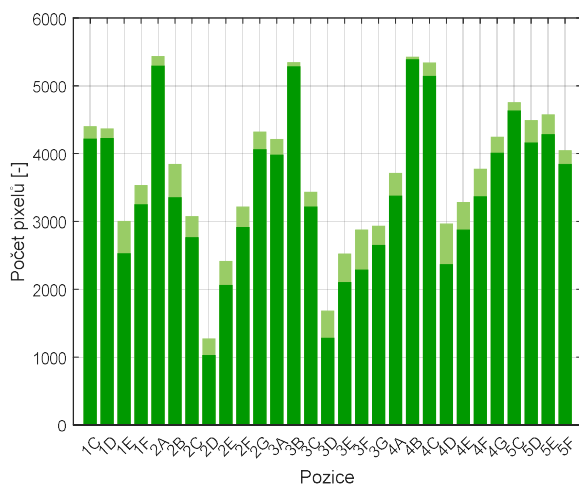
Zdroj: <http://www.gisagmaps.com/landsat-8-atco>

Tab. 3 Juliánské datum a odpovídající vzdálenost (*d*)

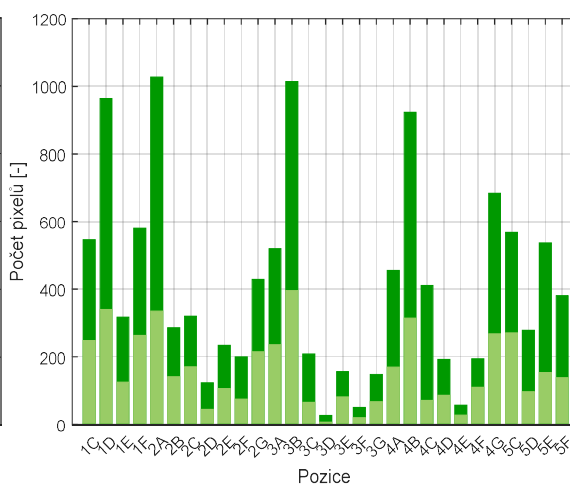
DOY	Vzdálenost	DOY	Vzdálenost	DOY	Vzdálenost
1	0,9832	121	1,0076	242	1,0092
15	0,9836	135	1,0109	258	1,0057
32	0,9853	152	1,0140	274	1,0011
60	0,9909	182	1,0167	305	0,9925
74	0,9945	196	1,0165	319	0,9892
91	0,9993	213	1,0149	335	0,9860
106	1,0033	227	1,0128	349	0,9843
DOY - Day of Year (Julian Day)				365	0,9833

Zdroj: tabulka je ze stránek [26, s. 5]

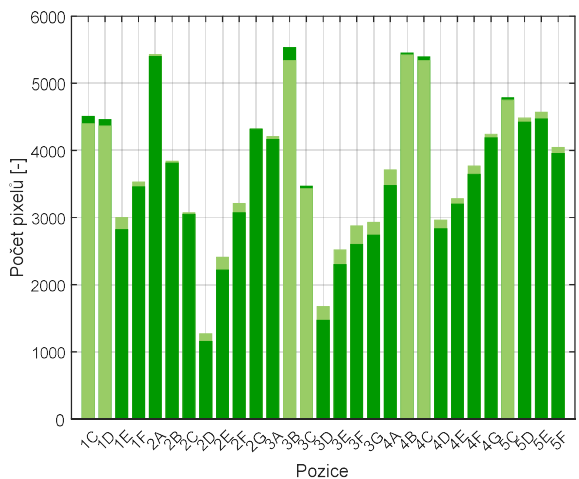
Vliv Pan-sharpeningu na NVDI – hodnoty pro jednotlivé oblasti



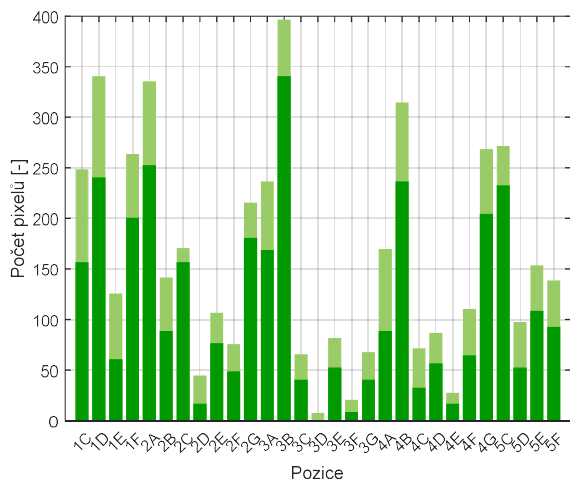
Obr. 1 Metoda IHS, léto, Landsat 8



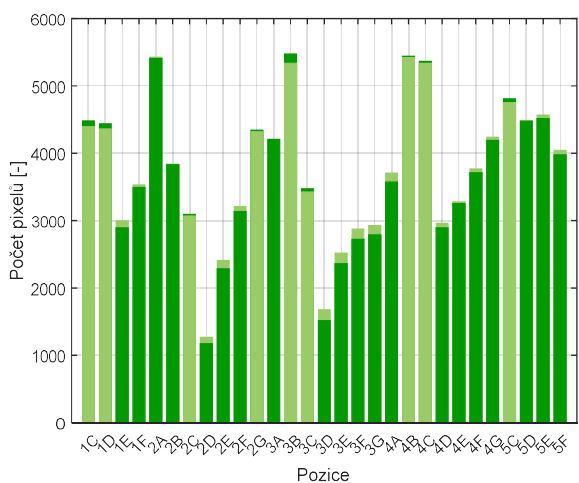
Obr. 2 Metoda IHS, zima, Landsat 8



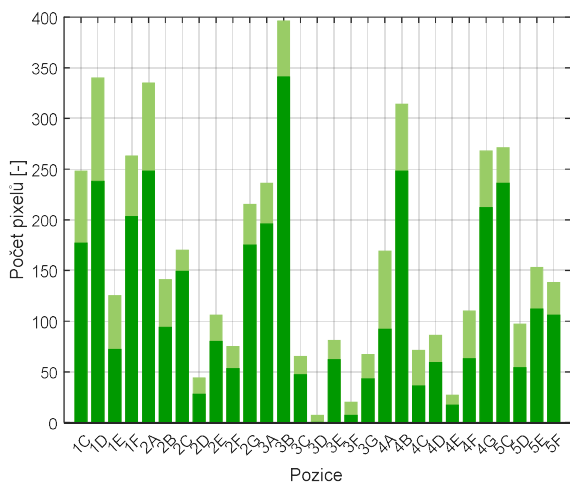
Obr. 3 Metoda BT, léto, Landsat 8



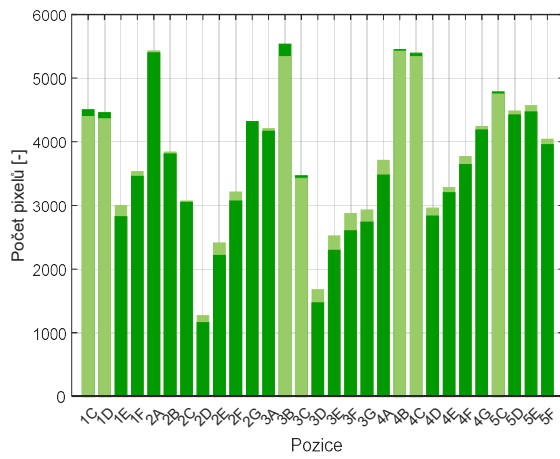
Obr. 4 Metoda BT, zima, Landsat 8



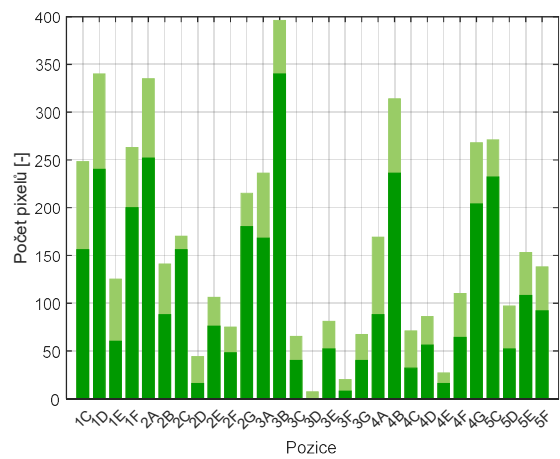
Obr. 5 Metoda HPFA, léto, Landsat 8



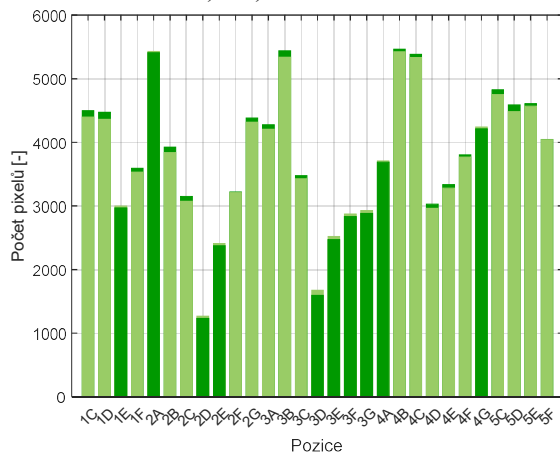
Obr. 6 Metoda HPFA, zima, Landsat 8



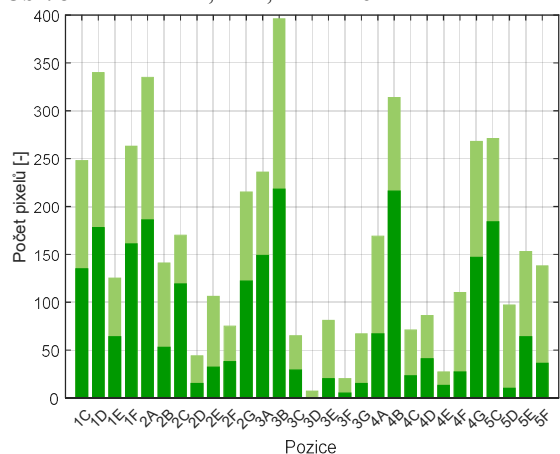
Obr. 7 Metoda HFM, léto, Landsat 8



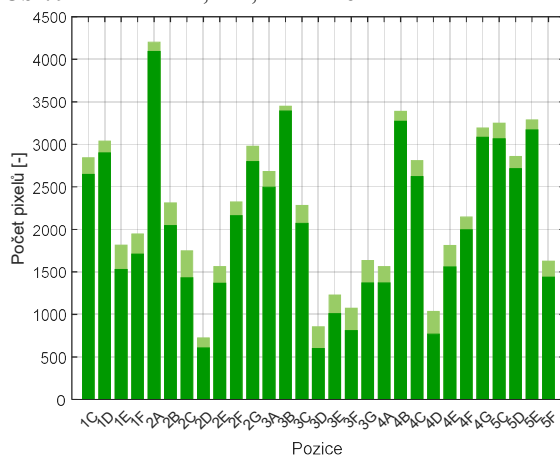
Obr. 8 Metoda HFM, zima, Landsat 8



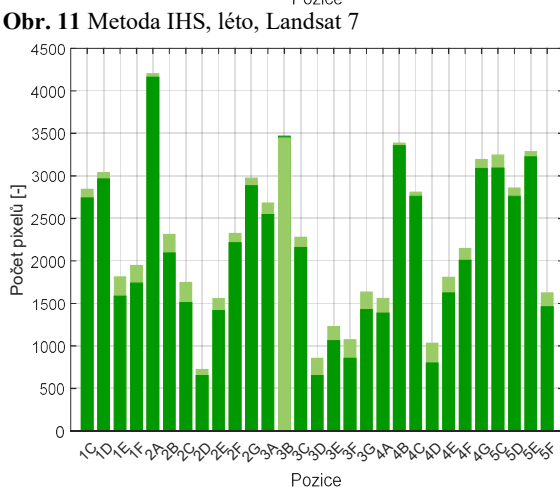
Obr. 9 Metoda HFA, léto, Landsat 8



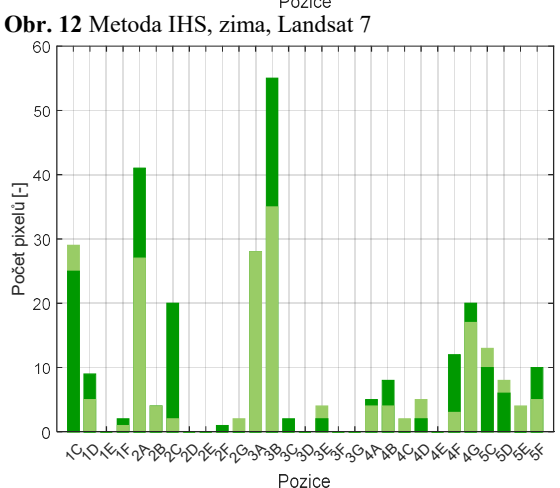
Obr. 10 Metoda DWT, zima, Landsat 8



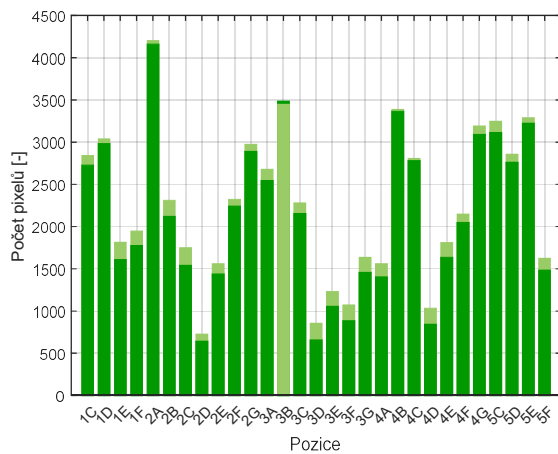
Obr. 12 Metoda IHS, zima, Landsat 7



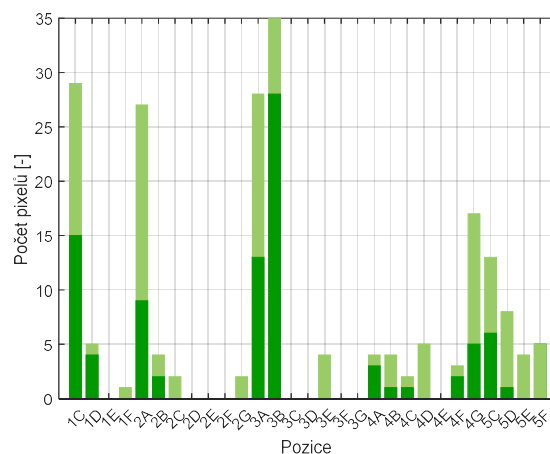
Obr. 13 Metoda BT, léto, Landsat 7



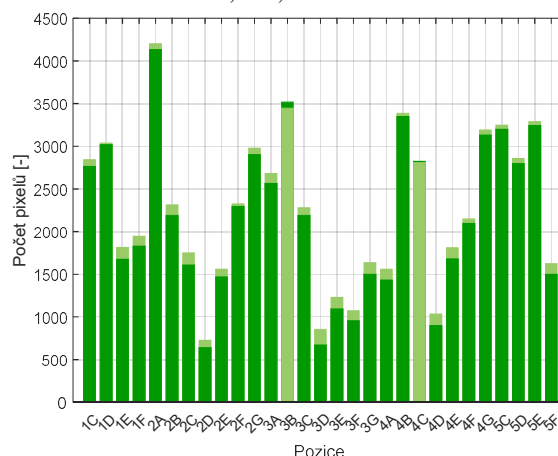
Obr. 14 Metoda BT, zima, Landsat 7



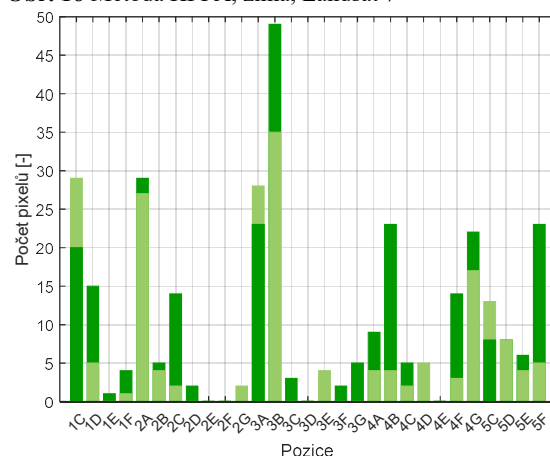
Obr. 15 Metoda HPFA, léto, Landsat 7



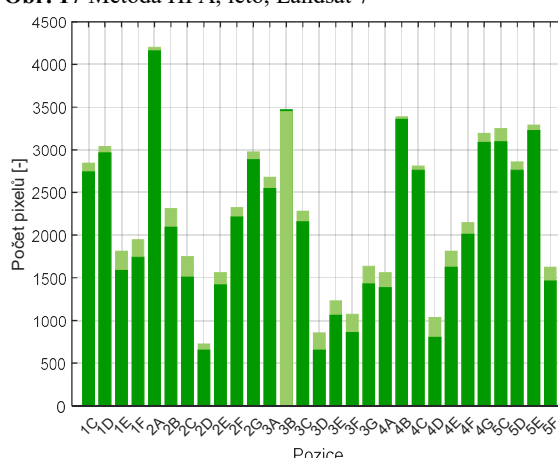
Obr. 16 Metoda HPFA, zima, Landsat 7



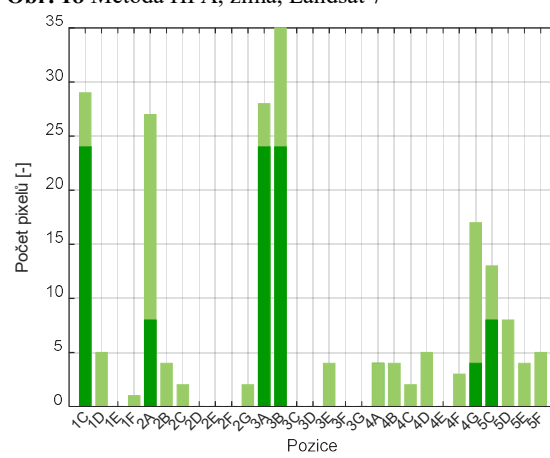
Obr. 17 Metoda HFA, léto, Landsat 7



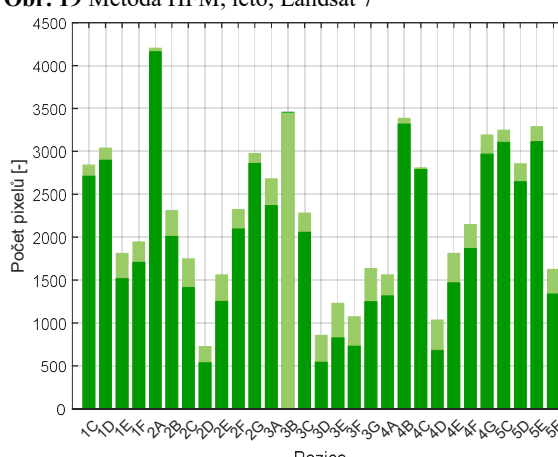
Obr. 18 Metoda HFA, zima, Landsat 7



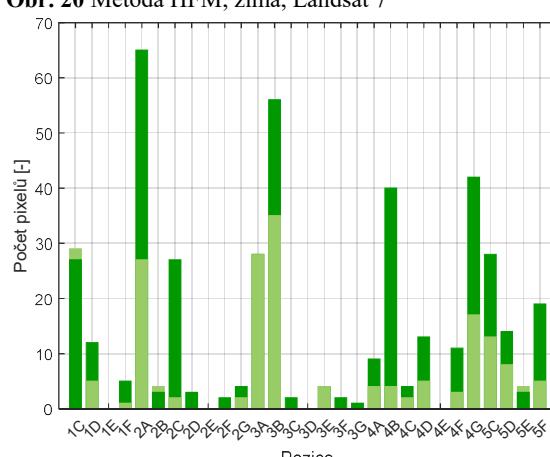
Obr. 19 Metoda HFM, léto, Landsat 7



Obr. 20 Metoda HFM, zima, Landsat 7

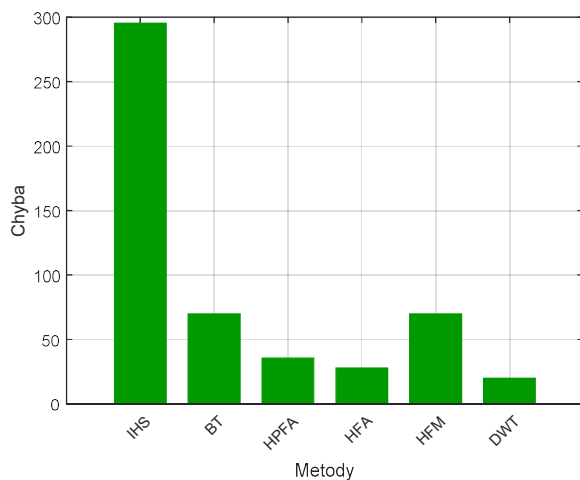


Obr. 21 Metoda DWT, léto, Landsat 7

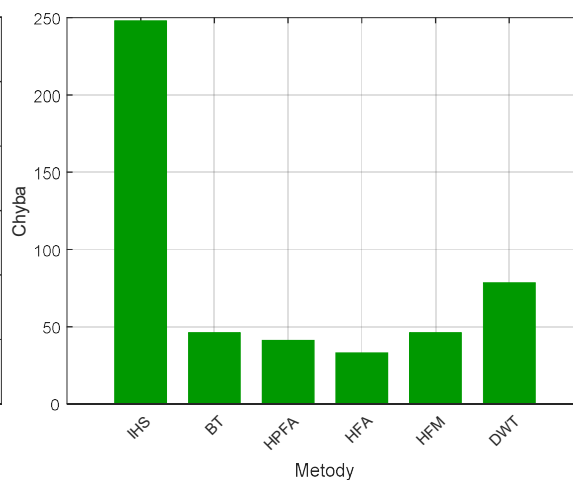


Obr. 22 Metoda DWT, zima, Landsat 7

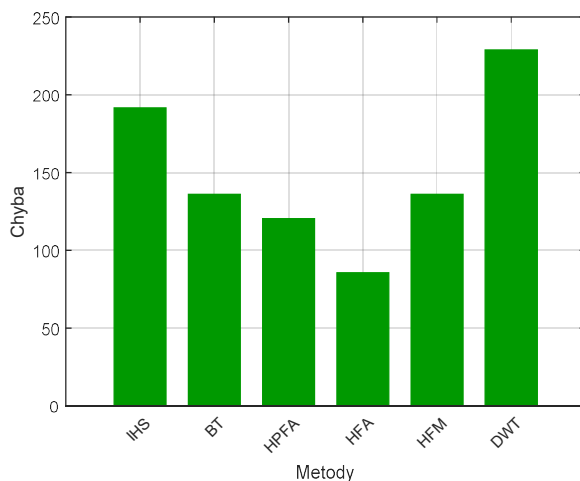
Vliv pan-sharpeningu na NVDI – průměrná chyba přes jednotlivé oblasti



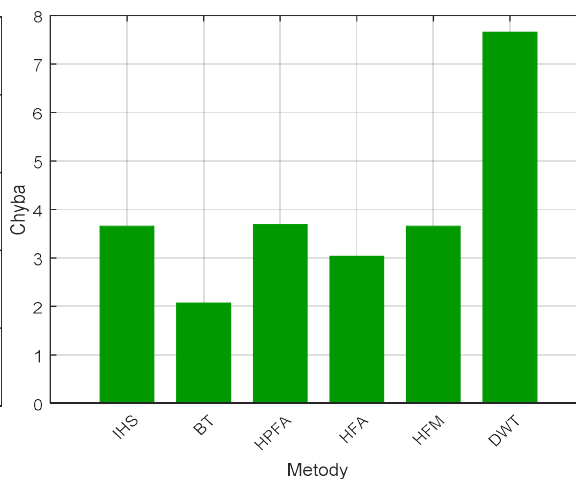
Obr. 23 Jednotlivé metody, léto, Landsat 8



Obr. 24 Jednotlivé metody, zima, Landsat 8



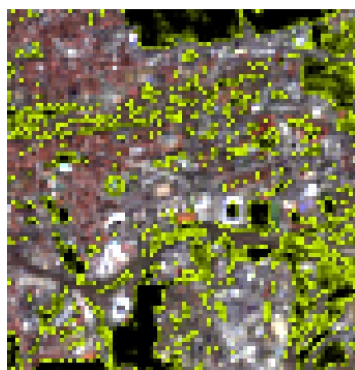
Obr. 25 Jednotlivé metody, léto, Landsat 7



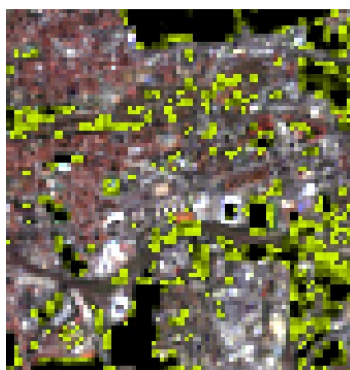
Obr. 26 Jednotlivé metody, zima, Landsat 7

Poznámka: Na těchto grafech je vypočítaná průměrná chyba (rozdíl mezi vylepšeným a referenčním snímkem přes všechny sektory) pro jednotlivé metody. Myslím si, že na grafu 26 je chyba malá z důvodu, že zde byly hodnoty NVDI tak nízko pod hranicí 0,5, že i po zkreslení pan-sharpeningem, nedošlo k překročení hranice, také viz obr. 48 – 54

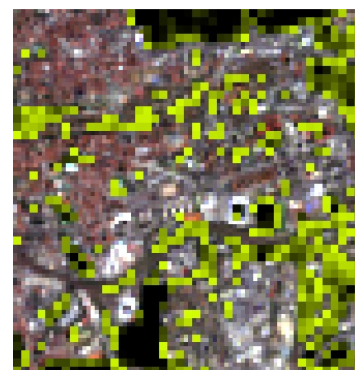
Vliv pan-sharpeningu na NVDI – obrázky pro oblast E3



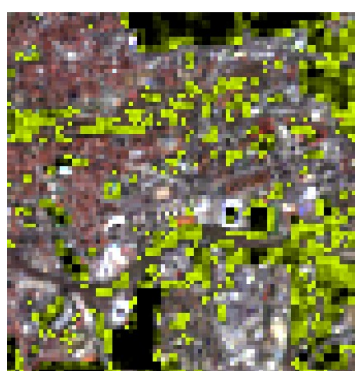
Obr. 27 Ref., léto, Landsat 8



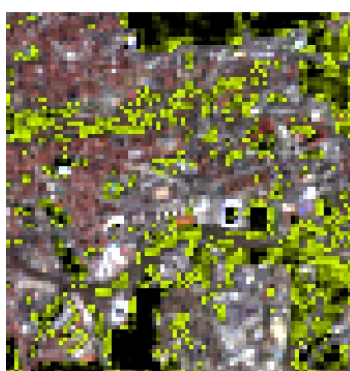
Obr. 28 IHS, léto, Landsat 8



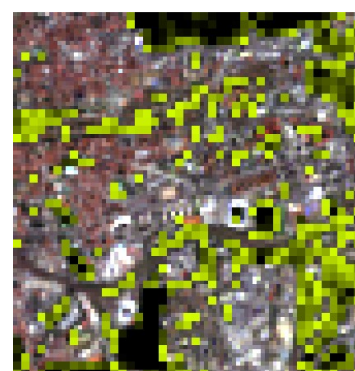
Obr. 29 BT, léto, Landsat 8



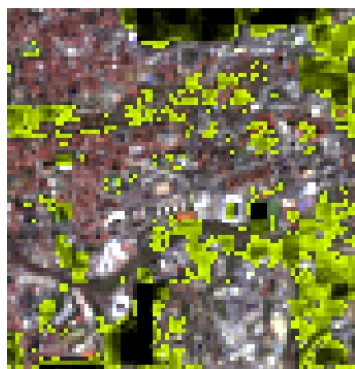
Obr. 30 HPFA, léto, Landsat 8



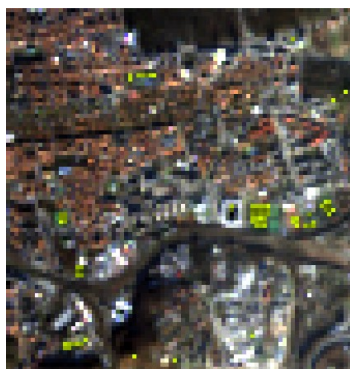
Obr. 31 HFA, léto, Landsat 8



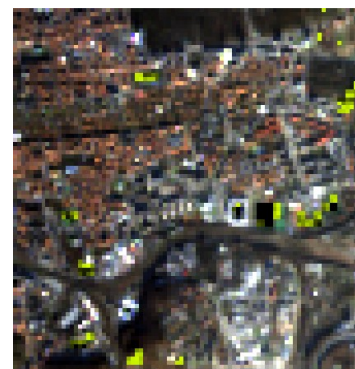
Obr. 32 HFM, léto, Landsat 8



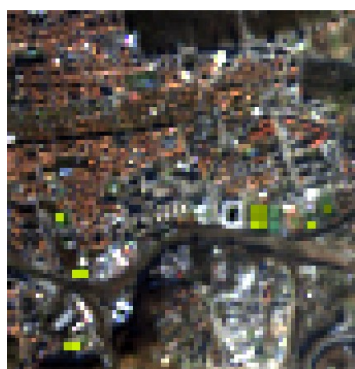
Obr. 33 DWT, léto, Landsat 8



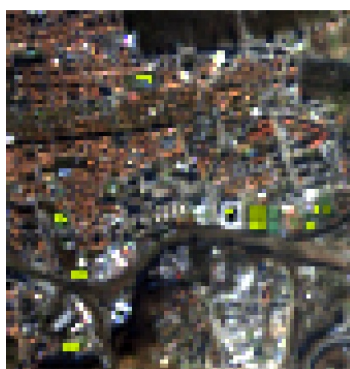
Obr. 34 Ref., zima, Landsat 8



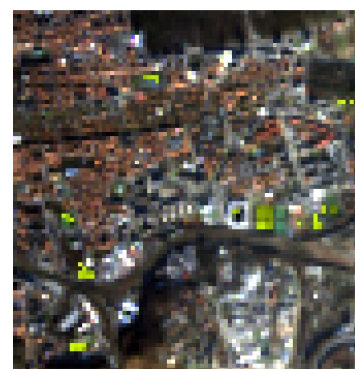
Obr. 35 IHS, zima, Landsat 8



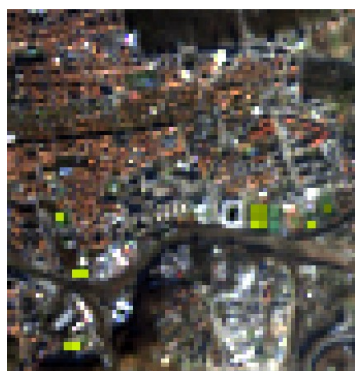
Obr. 36 BT, zima, Landsat 8



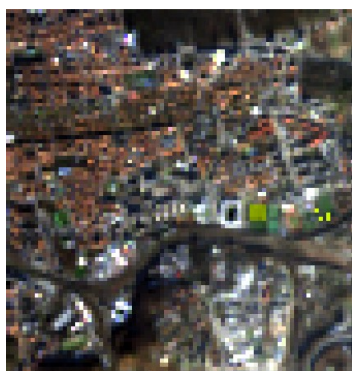
Obr. 37 HPFA, zima, Landsat 8



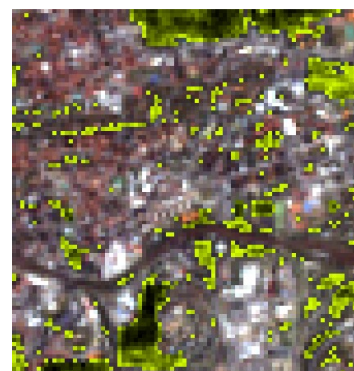
Obr. 38 HFA, zima, Landsat 8



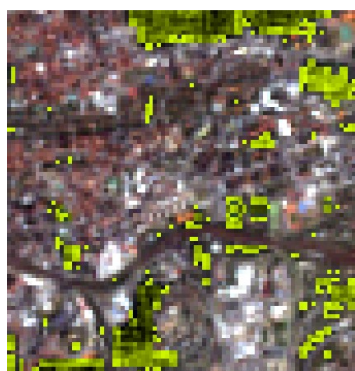
Obr. 39 HFM, léto, Landsat 8



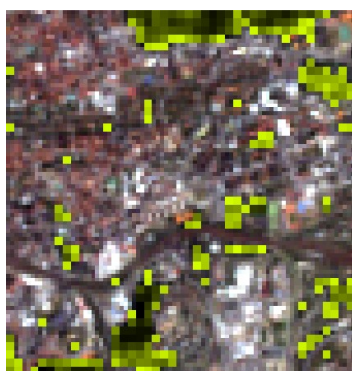
Obr. 40 DWT, zima, Landsat 8



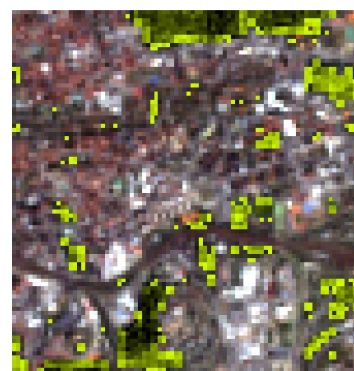
Obr. 41 Ref., léto Landsat 7



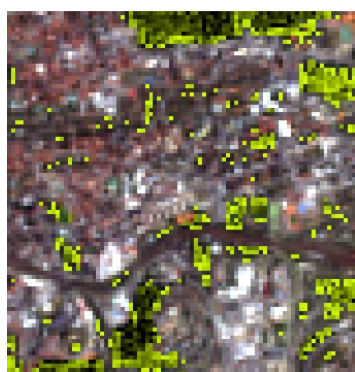
Obr. 42 IHS, léto, Landsat 7



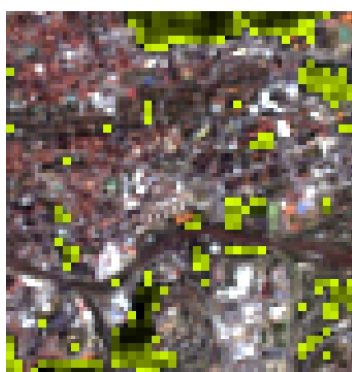
Obr. 43 BT, léto, Landsat 7



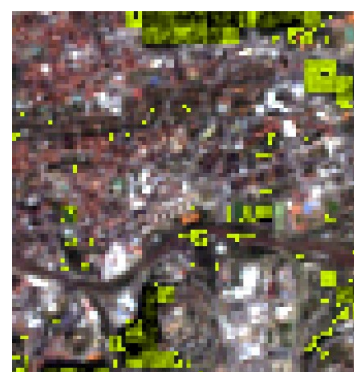
Obr. 44 HPFA, léto, Landsat 7



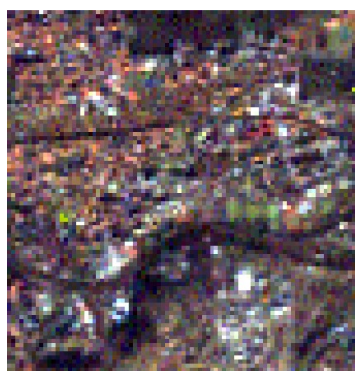
Obr. 45 HFA, léto, Landsat 7



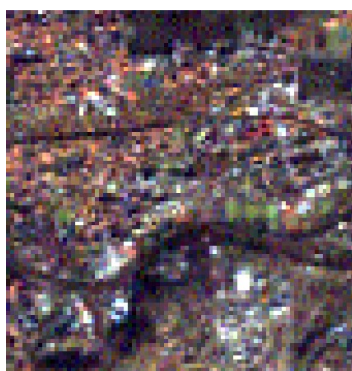
Obr. 46 HFM, léto, Landsat 7



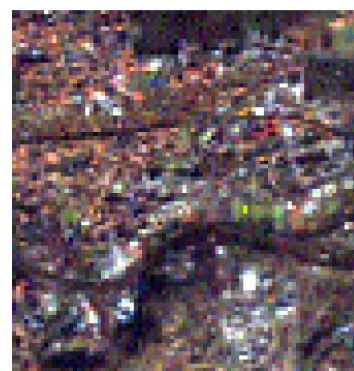
Obr. 47 DWT, léto, Landsat 7



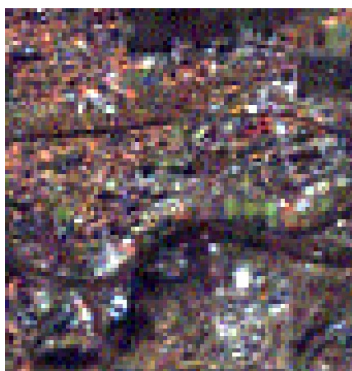
Obr. 48 Ref., zima Landsat 7



Obr. 49 IHS, zima, Landsat 7



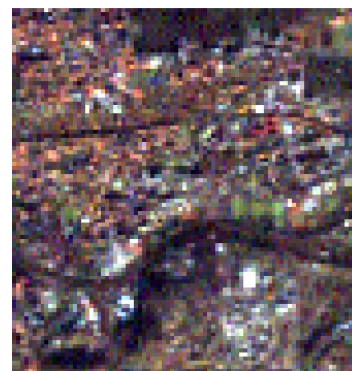
Obr. 50 BT, zima, Landsat 7



Obr. 51 HPFA, zima, Landsat 7



Obr. 52 HFA, zima, Landsat 7

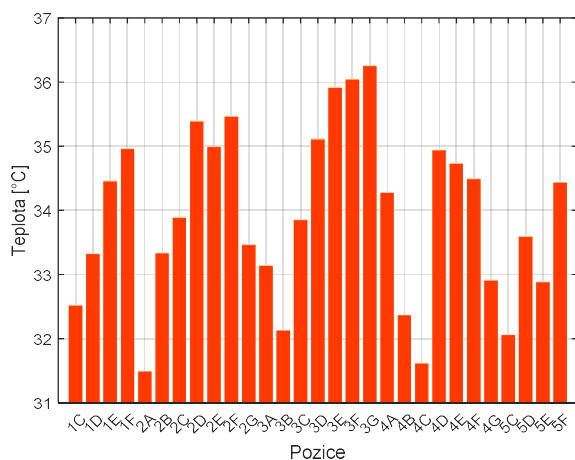


Obr. 53 HFA, zima, Landsat 7

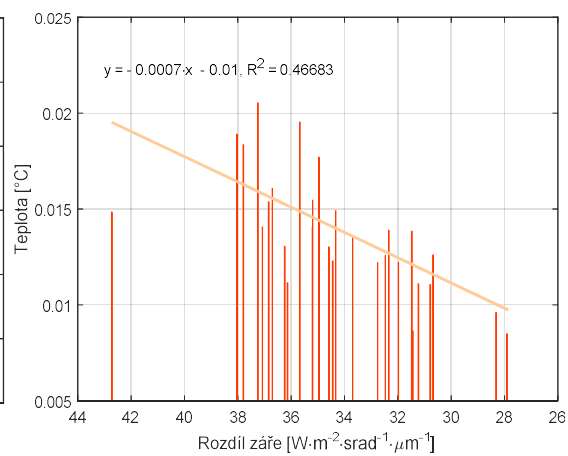


Obr. 54 DWT, zima, Landsat 7

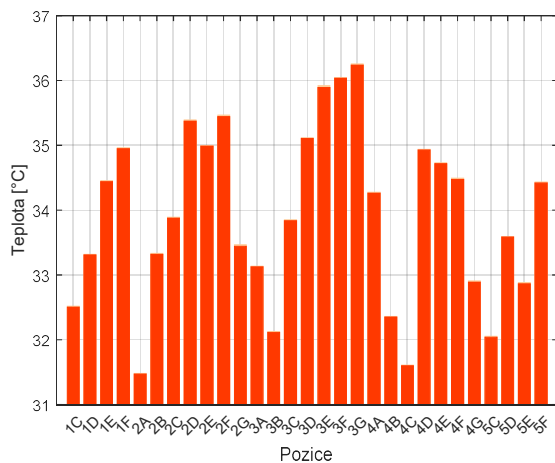
Vliv pan-sharpeningu na teplotní snímek – hodnoty pro jednotlivé oblasti



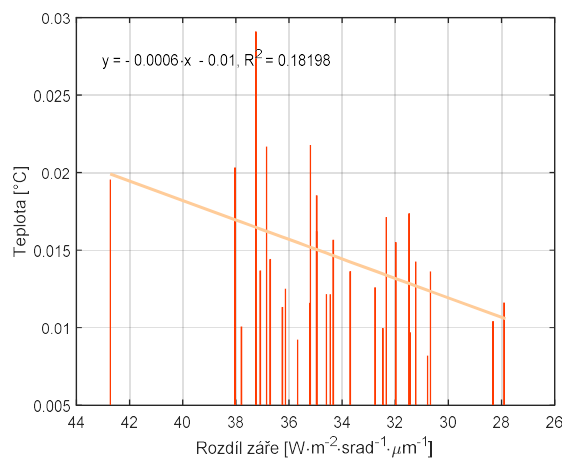
Obr. 55 Metoda HFA, léto



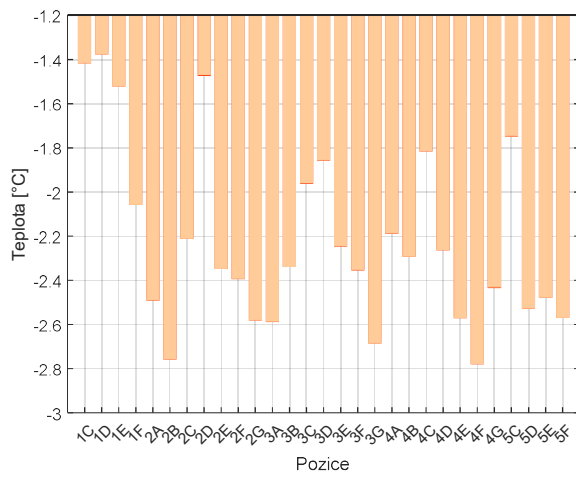
Obr. 56 Metoda HFA, rozdíl hodnot, léto



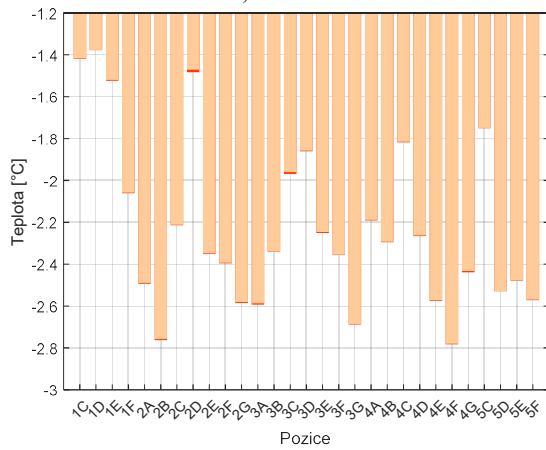
Obr. 57 Metoda DWT, léto



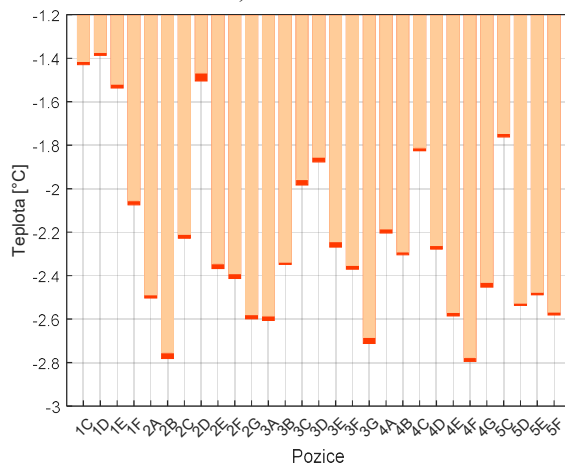
Obr. 58 Metoda DWT, rozdíl hodnot, léto



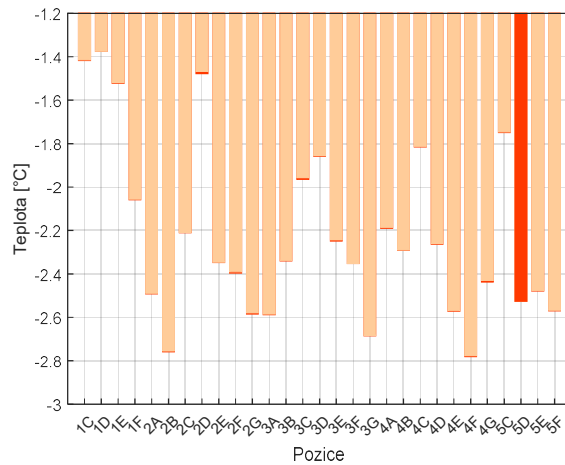
Obr. 59 Metoda HPFA, zima



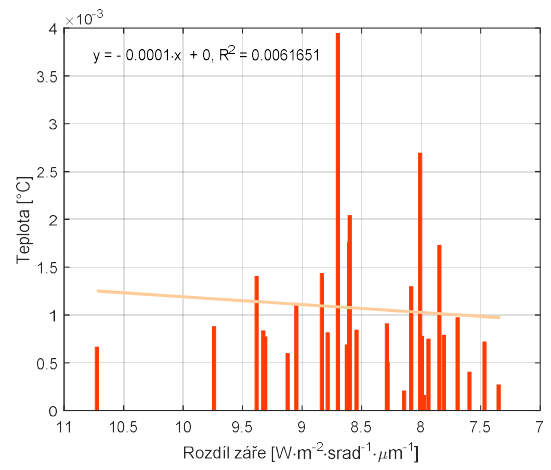
Obr. 61 Metoda HFA, zima



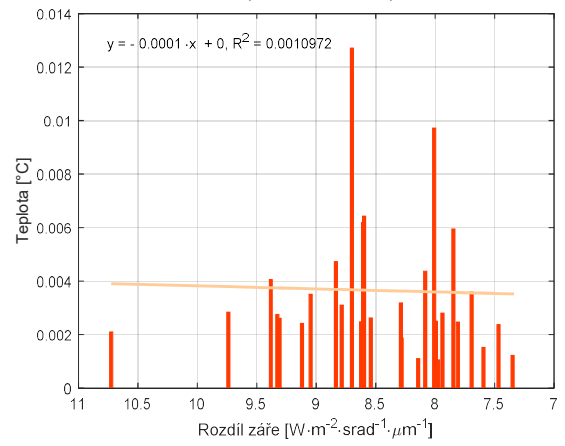
Obr. 63 Metoda HFM, zima



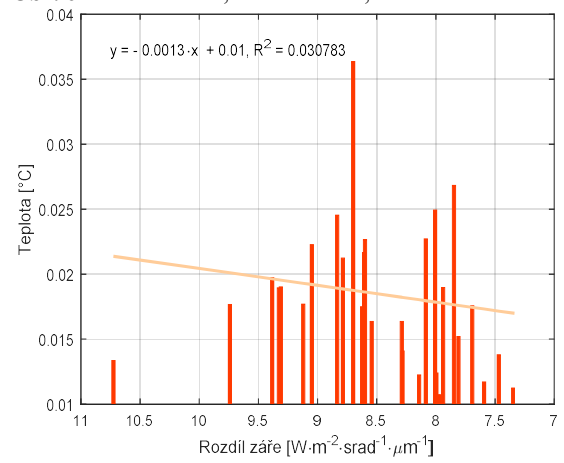
Obr. 65 Metoda DWT, zima



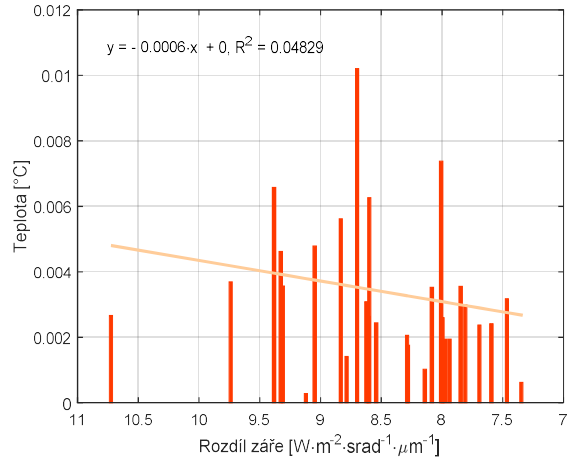
Obr. 60 Metoda HPFA, rozdíl hodnot, zima



Obr. 62 Metoda HFA, rozdíl hodnot, zima

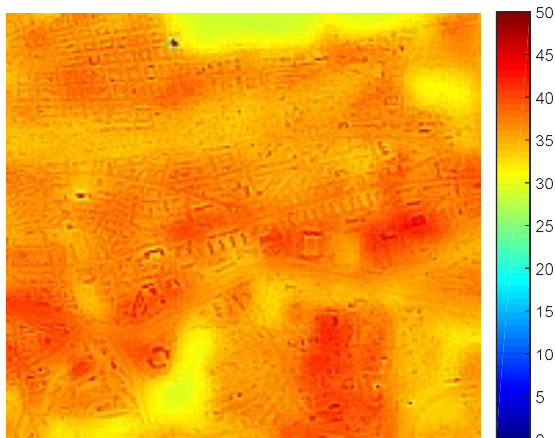


Obr. 64 Metoda HFM, rozdíl hodnot, zima

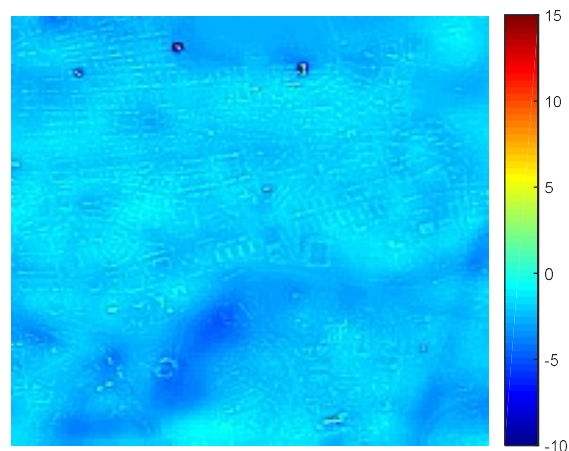


Obr. 66 Metoda DWT, rozdíl hodnot, zima

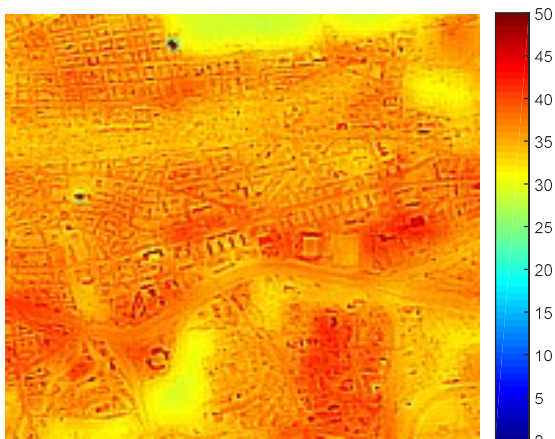
Vliv pan-sharpeningu na teplotní snímek – obrázky pro oblast E3



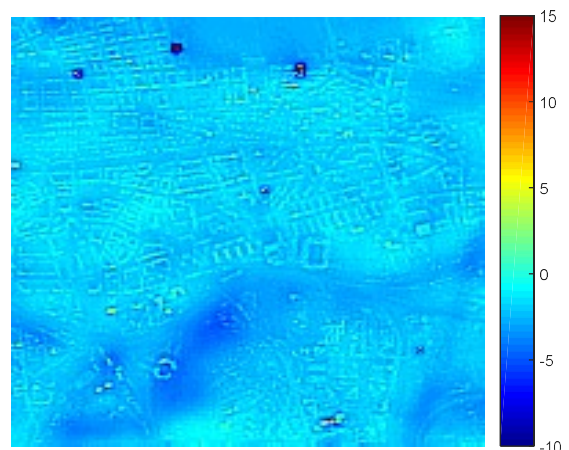
Obr. 67 Metoda HPFA, léto



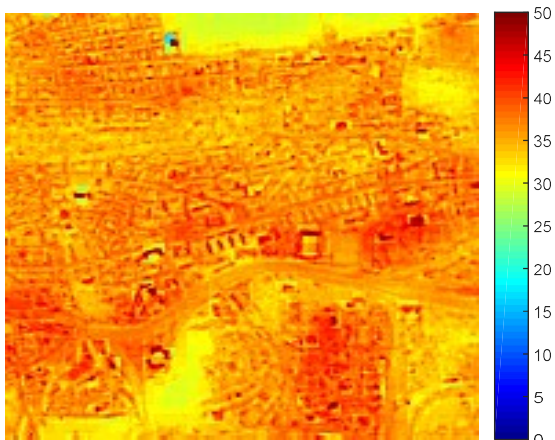
Obr. 68 Metoda HPFA, zima



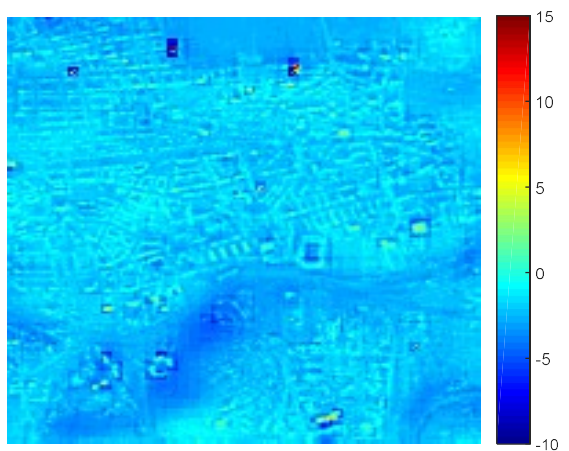
Obr. 69 Metoda HFA, léto



Obr. 70 Metoda HFA, zima

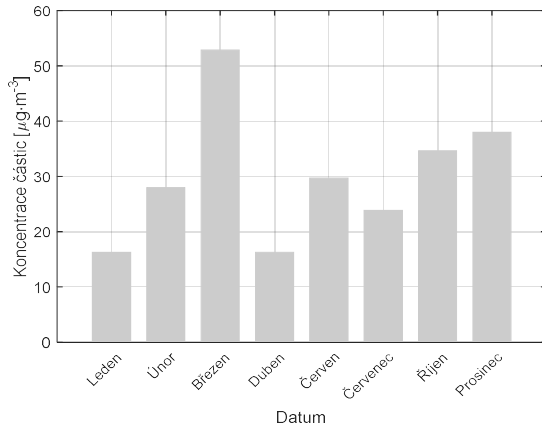


Obr. 71 Metoda DWT, léto

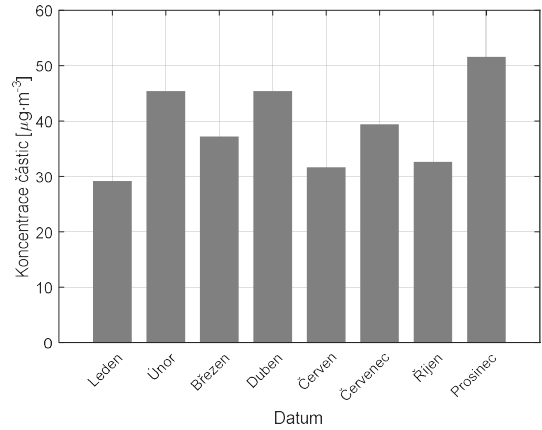


Obr. 72 Metoda DWT, zima

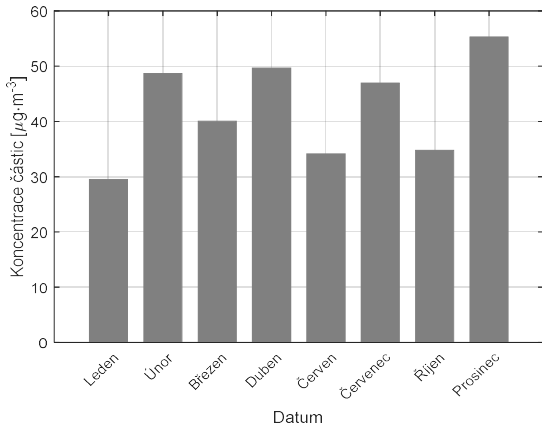
Koncentrace částic PM10 v Praze



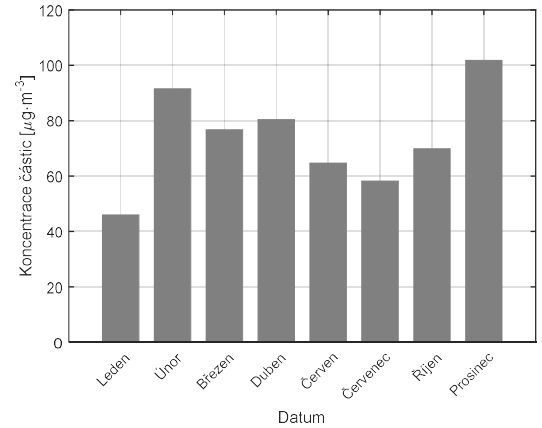
Obr. 73 Zjištěná průměrná koncentrace



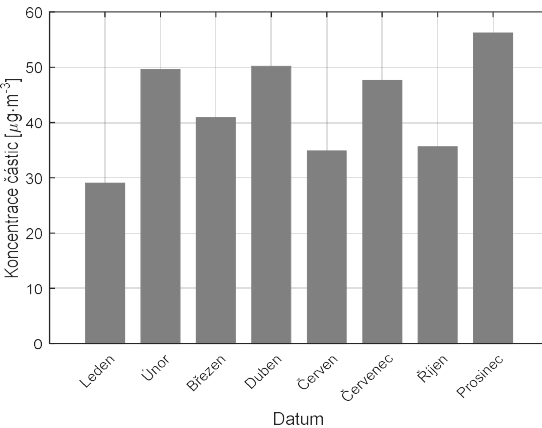
Obr. 74 $PM_{10} = 396 \cdot B_{atm} + 256 \cdot G_{atm} - 194 \cdot R_{atm}$



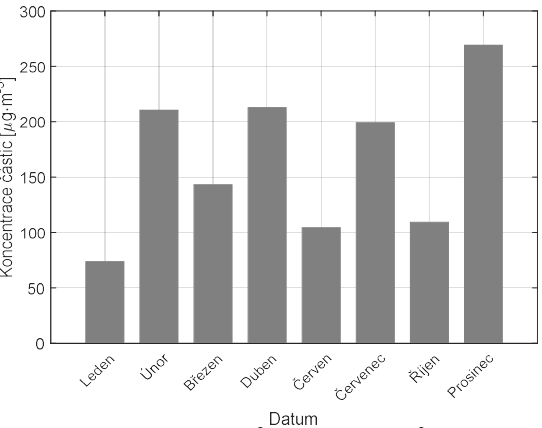
Obr. 75 $PM_{10} = 463 \cdot B_{atm} + 66 \cdot G_{atm}$



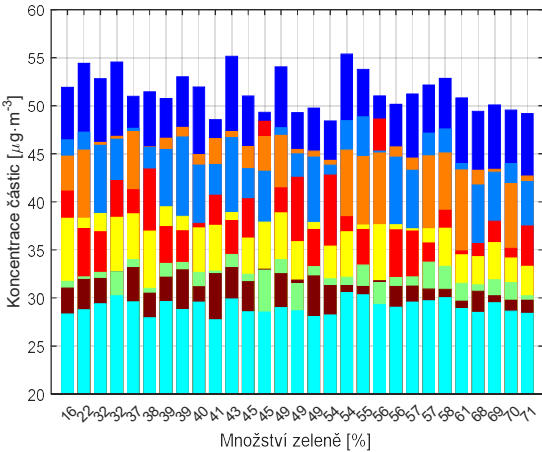
Obr. 76 $PM_{10} = 1162 \cdot B_{atm} + 858 \cdot R_{atm}$



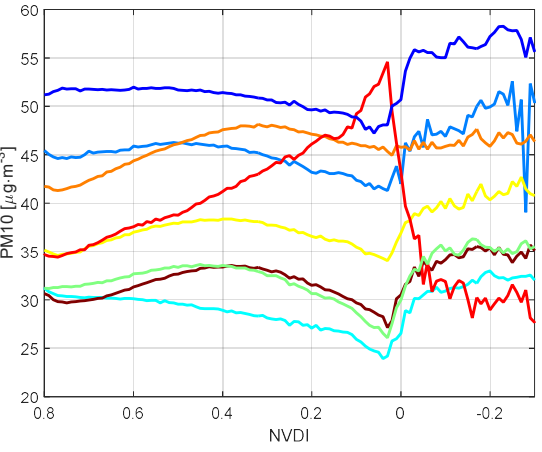
Obr. 77 $PM_{10} = 498 \cdot B_{atm} + 15 \cdot R_{atm}$



Obr. 78 $PM_{10} = 748 \cdot B_{atm}^2 + 22052 \cdot B_{atm}$

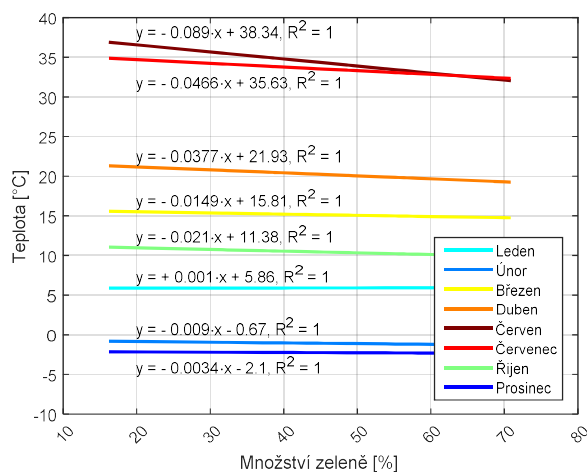


Obr. 79 Průměrné koncentrace pro oblasti

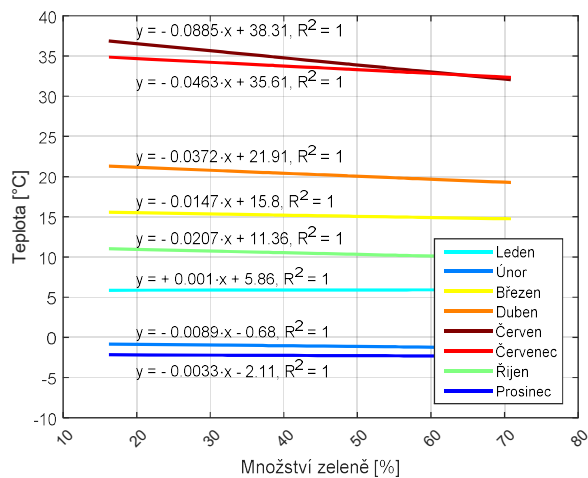


Obr. 80 Závislost PM10 na NVDI

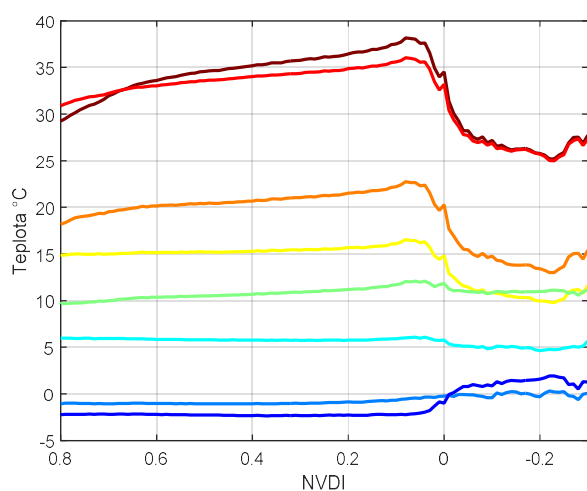
Teplotní proměna města Prahy – rozdíl vylepšený a původní obraz



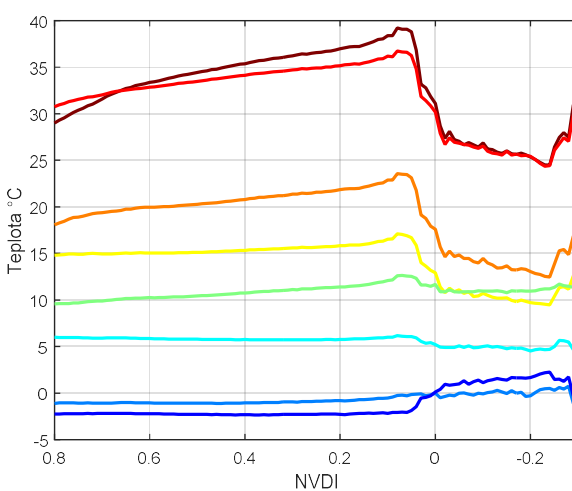
Obr. 81 Původní snímek



Obr. 82 Pan-sharpening

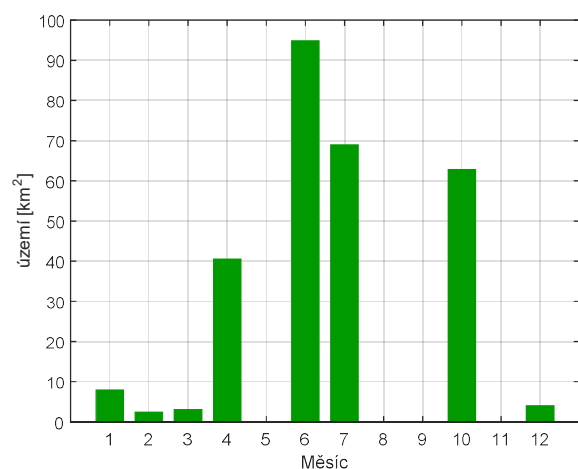


Obr. 83 Původní snímek

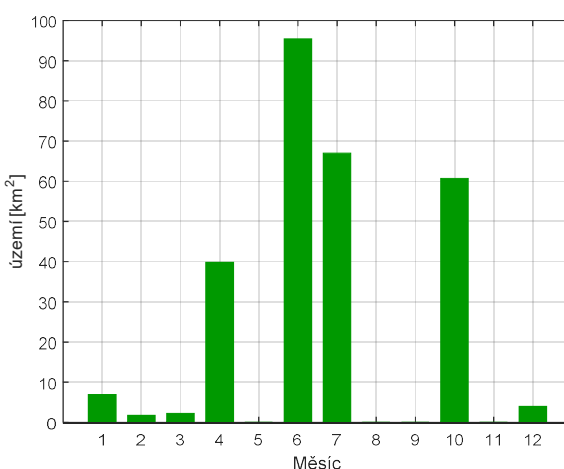


Obr. 84 Pan-sharpening

Změna indexu NVDI v průběhu roku – rozdíl vylepšený a původní obraz



Obr. 85 družice Landsat 8, původní snímek



Obr. 86 družice Landsat 8, pan-sharpening

PAN-SHARPENING

Použité zdroje nevytvořených metod

1. <https://github.com/sjtrny/FuseBox>
2. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/36345-discrete-cosine-transform-based-image-fusion-techniques>

Tab. 4 Změřené hodnoty pro sledované metody

Metody	CORR	SSIM	SSIM _{norm}	JQM	MSE	PSNR	Čas
IHS	0,990	0,960	0,985	0,99002	6,43E+06	28,491	27,14
BT	0,990	0,960	0,985	0,99001	7,03E+06	28,107	25,63
DWT	0,987	0,957	0,985	0,98798	6,41E+06	28,460	39,65
HFM	0,987	0,933	0,983	0,98772	5,98E+06	28,801	25,40
HFA	0,987	0,923	0,980	0,98728	1,09E+07	26,124	24,25
HPFA	0,986	0,931	0,983	0,98726	4,23E+06	30,308	25,19
DCTe	0,983	0,980	0,987	0,98692	8,84E+06	27,025	1922,33
DCTah	0,984	0,973	0,986	0,98690	7,43E+06	27,806	364,42
DCTm	0,983	0,977	0,986	0,98684	8,53E+06	27,178	356,99
Mean	0,984	0,942	0,986	0,98623	6,83E+06	28,185	25,72
MLT	0,984	0,942	0,984	0,98619	6,92E+06	28,144	25,21
DCTav	0,984	0,942	0,984	0,98618	6,84E+06	28,179	349,01
PCA	0,981	0,785	0,972	0,98148	3,60E+07	21,029	29,22
RES	0,981	0,754	0,970	0,98080	8,22E+06	27,427	23,87

Poznámka: Metody jsou srovnané podle hodnot JQM od největší po nejmenší

Tab. 5 Změřené hodnoty pro HPFA

HPFA	CORR	SSIM	SSIM _{norm}	JQM	MSE	PSNR
Band 1	0,987	0,886	0,986	0,98655	4,23E+06	30,334
Band 2	0,987	0,926	0,987	0,98658	4,09E+06	30,523
Band 3	0,986	0,935	0,986	0,98613	4,40E+06	30,083
Band 4	0,986	0,934	0,986	0,98593	4,21E+06	30,345
Band 5	0,970	0,358	0,940	0,95505	1,85E+07	23,775
Band 6	0,981	0,710	0,979	0,98027	9,67E+06	26,569
Band10	0,993	0,666	0,989	0,99139	6,48E+06	28,409
Band 11	0,993	0,669	0,989	0,99131	6,47E+06	28,420
Band 7	0,985	0,864	0,985	0,98519	5,66E+06	28,990

Tab. 6 Změřené hodnoty pro HFA

HFA	CORR	SSIM	SSIM _{norm}	JQM	MSE	PSNR
Band 1	0,985	0,895	0,986	0,98585	1,25E+07	25,500
Band 2	0,986	0,925	0,986	0,98629	1,16E+07	25,852
Band 3	0,987	0,922	0,986	0,98632	1,08E+07	26,179
Band 4	0,987	0,920	0,986	0,98619	1,04E+07	26,362
Band 5	0,965	0,431	0,957	0,96102	3,20E+07	21,469
Band 6	0,982	0,726	0,980	0,98112	1,66E+07	24,369
Band10	0,988	0,741	0,994	0,99075	2,25E+07	22,998
Band 11	0,988	0,740	0,993	0,99062	2,24E+07	23,011
Band 7	0,986	0,862	0,985	0,98545	1,26E+07	25,586

Tab. 7 Změřené hodnoty pro HFM

HFM	CORR	SSIM	SSIM _{norm}	JQM	MSE	PSNR
Band 1	0,986	0,891	0,986	0,98640	8,09E+06	27,575
Band 2	0,987	0,929	0,987	0,98688	6,29E+06	28,681
Band 3	0,987	0,937	0,986	0,98677	6,68E+06	28,242
Band 4	0,987	0,933	0,986	0,98635	4,96E+06	29,632
Band 5	0,970	0,363	0,942	0,95579	2,74E+07	22,079
Band 6	0,983	0,710	0,979	0,98114	1,43E+07	24,847
Band10	0,987	0,712	0,992	0,98951	2,20E+07	23,132
Band 11	0,987	0,711	0,992	0,98933	2,25E+07	23,042
Band 7	0,986	0,865	0,985	0,98574	7,61E+06	27,639

Tab. 8 Změřené hodnoty pro DWT

DWT	CORR	SSIM	SSIM _{norm}	JQM	MSE	PSNR
Band 1	0,983	0,916	0,987	0,98509	8,09E+06	27,423
Band 2	0,986	0,952	0,987	0,98647	6,76E+06	28,248
Band 3	0,987	0,960	0,987	0,98699	6,51E+06	28,367
Band 4	0,987	0,959	0,987	0,98692	5,97E+06	28,793
Band 5	0,901	0,490	0,970	0,93529	6,36E+07	18,482
Band 6	0,968	0,761	0,983	0,97546	2,46E+07	22,528
Band10	0,973	0,752	0,994	0,98352	2,36E+07	22,792
Band 11	0,973	0,752	0,994	0,98364	2,32E+07	22,863
Band 7	0,981	0,901	0,986	0,98354	1,20E+07	25,765

Tab. 9 Změřené hodnoty pro ImRes

ImRes	CORR	SSIM	SSIM _{norm}	JQM	MSE	PSNR
Band 1	0,982	0,674	0,982	0,98190	6,29E+06	28,714
Band 2	0,982	0,727	0,982	0,98158	7,11E+06	28,177
Band 3	0,980	0,767	0,980	0,98035	8,75E+06	27,086
Band 4	0,980	0,767	0,980	0,98047	8,80E+06	27,151
Band 5	0,968	0,181	0,901	0,93424	1,56E+07	24,538
Band 6	0,968	0,562	0,968	0,96789	1,34E+07	25,134
Band10	0,994	0,385	0,973	0,98352	7,31E+04	47,824
Band 11	0,994	0,392	0,973	0,98364	9,34E+04	46,776
Band 7	0,981	0,705	0,981	0,98086	9,40E+06	26,714



Obr. 87 Panchromatický snímek



Obr. 88 Původní snímek



Obr. 89 IHS



Obr. 90 Brovey transform



Obr. 91 DWT



Obr. 92 HFM



Obr. 93 HFA



Obr. 94 HPFA



Obr. 95 DCTe



Obr. 96 DCTah



Obr. 97 DCTma



Obr. 98 Mean



Obr. 99 MLT



Obr. 100 DCTav



Obr. 101 PCA

Příloha C

OBSAH PŘILOŽENÉHO NOSIČE

- *Monitorován_městských_aglomerací_pomoci_satelitních_obrazových_dat.pdf* diplomová práce
- *Monitorován_městských_aglomerací_pomoci_satelitních_obrazových_dat.docx* diplomová práce
- *ukazka* ukázka s pěti skripty
- *odkaz pro stažení celé přílohy: dbq.multimediatech.cz/users/hlinovsky/public*

- *data_1993-2016*..... soubory s družicovými snímky Landsat 4 – 8
- *data_2015_Landsat* soubory s družicovými snímky Landsat 8 pouze rok 2015
- *data_2016_Sentinel* soubory s družicovými snímky Sentinel-2A pouze rok 2016
- *data_teplota* data pro zobrazení srážek a teploty
- *funkce* funkce pro matlabovské skripty
- **PABSHARPENING_hodnoceni** soubory pro hodnocení
 - LC81920252015285LGN00 družicový snímek Landsat 8 z 12. října 2015
 - Brovey transform
 - DCT based Image Fusion
 - DWT based Image Fusion
 - Frequency Filtering method
 - IHS fusion
 - ImResize
 - Multiplicative method
 - PCA method
 - Prumerovani
- *Graf_zavislosti_teploty_na_NVDI.m**
- *Graf_zavislosti_teploty_na_NVDI_bez_zvyseni_PR_rozliseni.m***
- *Grafy_hodnoceni_pansharpening.m*
- *Koncentrace_castic_PM10_v_Praze.m*
- *Teplotni_promena_mesta_Prahy.m*
- *Teplotni_promena_mesta_Prahy_bez_zvyseni_PR_rozliseni.m****
- *Vliv_Pan_sharpeningu_na_NVDI_Landsat7.m*
- *Vliv_Pan_sharpeningu_na_NVDI_Landsat8.m*
- *Vliv_Pan_sharpeningu_na_teplotni_snimek_Landsat8.m*
- *Zmena_indexu_NVDI_v_prubehu_roku_Landsat8_2015*
- *Zmena_indexu_NVDI_v_prubehu_roku_Landsat8_2015_zvysene_PR*****
- *Zmena_indexu_NVDI_v_prubehu_roku_Sentinel_2016*
- *Zmena_zalesneni_v_Praze_od_roku_1984_do_2016_EVI_TOA_refl.m*
- *Zmena_zalesneni_v_Praze_od_roku_1984_do_2016_NVDI_SURF_refl.m*
- *Zmena_zalesneni_v_Praze_od_roku_1984_do_2016_NVDI_TOA_refl.m*
- *Zmena_zalesneni_v_Praze_od_roku_1984_do_2016_TCT_TOA_refl.m*
- *Zobrazeni_mnozstvi_srazek_a_teploty.m******
- *Zobrazeni_rozdeleni_s_vyznacnim_mnozstvi_zelene.m******

Poznámka: Názvy skriptů korespondují s názvy kapitol 6.7.1 – 6.7.6 a výstupem jsou stejné grafy, názvy metod pro hodnocení zvýšení prostorového rozlišení jsou označeny stejně jako v kapitole Pan-sharpening,

* graf je pro obrázek 6.38, ** graf je pro obrázek 83, *** graf je pro obrázek 81, **** Graf je pro obrázek 86, ***** Grafy jsou pro obrázky 6.62, 6.63 a 6.64, ***** výstup je pro obr. 6.33,

Složky s metodami obsahují skript *demo_nazevMetody.m* pro zobrazení výsledku zvýšení prostorového rozlišení, *demo_nazevMetodyQAssesement.m* pro výpočet MSE, PSNR, SSIM a CORR z RGB snímku, metody DWT, HPFA, HFA, HFM a ImRes obsahují ještě skript *demo_nazevMetodyQAssesement_pouze_jeden_obrazek.m* pro výpočet MSE, PSNR, SSIM a CORR pouze z jednoho snímku