

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

**Hodnocení vlivu interpolace při koregistraci
radarových snímků**

Diplomová práce

Jana Slačiková

září 2010

Vedoucí diplomové práce: Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně, pouze s použitím uvedených zdrojů a literatury. Jsem si vědoma toho, že případné použití výsledků, získaných v této práci, mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity. Svoluji k zapůjčení této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

V Praze dne 1. 9. 2010

.....

Jana Slačiková

Poděkování patří vedoucí diplomové práce Ing. Markétě Potůčkové, Ph.D. za cenné připomínky a pomoc při zpracování práce, Zeměměřickému úřadu Pardubice, České informační agentuře životního prostředí CENIA a Evropské kosmické agentuře ESA za poskytnutí dat.

Hodnocení vlivu interpolace při koregistraci radarových snímků

Abstrakt

Koregistrace dvou radarových snímků se subpixelovou přesností je nezbytná pro správné odečtení fáze a vytvoření interferogramu. Chyby vzniklé při koregistraci se v interferogramu projevují zvýšením šumu. Posledním krokem při koregistraci je převzorkování jednoho z radarových snímků na mřížku snímku druhého. Také tento krok ovlivňuje kvalitu interferogramu. Na reálných datech z tandemu družic ERS byly vyzkoušeny interpolační metody *Nearest Neighbor*, *Bilinear interpolation*, *Cubic Convolution* a výpočetně náročnější metody *Raised Cosine kernel*, *Knab interpolation kernel* a *Truncated Sinc*. Výsledky byly porovnány s teoretickými výpočty a simulačními studiemi z předchozích výzkumů (Hanssen, Bamler, 1999), (Migliaccio, Bruno, 2003) a (Cho ... [et al.], 2005).

Cílem práce bylo porovnat vliv interpolačních metod na reálná data. Vliv na kvalitu interferogramu byl hodnocen pomocí koherence (Touzi ... [et al.], 1999) a sumy fázových rozdílů (Li ... [et al.], 2004). Nic nenasvědčuje tomu, že by výpočetně náročnější metody dosahovaly lepších výsledků než metoda *Cubic Convolution*. Byla ověřována možnost hodnotit vliv interpolačních metod pomocí přesnosti DMT (Li, Bethel, 2008). Jako referenční digitální modely terénu byly použity ZABAGED a digitální model terénu z laserového skenování ČR. Přesnost DMT byla zkoumána také s ohledem na Land Cover. Rozlišení výsledného SAR DMT je 40 m × 40 m. Z výsledků vyplývá, že výběr interpolační metody nemá na přesnost výsledného DMT vliv.

Klíčová slova: InSAR DMT, ERS, Převzorkování, Interpolační metody

Evaluation of influence of interpolation methods on coregistration of radar images

Abstract

SAR interferogram processing requires subpixel coregistration of SAR image pair for accurate phase differencing. Errors in alignment introduce phase noise in SAR interferogram. Last step in coregistration is resampling one of SAR images. Also this step introduces errors in SAR interferogram. The resampling algorithms *Nearest Neighbor*, *Bilinear interpolation*, *Cubic Convolution* and advanced methods such as *Raised Cosine kernel*, *Knab interpolation kernel* and *Truncated Sinc* were tested on ERS tandem data and compared. The results were compared with the theory and simulations of earlier investigations (Hanssen, Bamler, 1999), (Migliaccio, Bruno, 2003) and (Cho ... [et al.], 2005).

The main experiment in this work was to examine and compare resampling methods on real data to evaluate their effect on the interferometric phase quality and DEM generation. The coregistration performance was evaluated by the coherence (Touzi ... [et al.], 1999) and the sum of phase differences (Li ... [et al.], 2004). No evidence showed that computationally intensive algorithms produced better quality of interferogram than *Cubic Convolution*. The possibilities of evaluating by means of the accuracy of the final InSAR DEM (Li, Bethel, 2008) were examined. External digital elevation model from the digital geographical model of the Czech Republic, ZABAGED, and digital geographical model from airborne laser scanning were used for validation. Effect of Land Cover was examined. The resolution of the final InSAR DEM is 40 m × 40 m. The final InSAR DEM accuracy not depends on the interpolation method selection.

Keywords: InSAR DEM Generation, ERS, Resampling, Interpolation

OBSAH

Seznam obrázků a tabulek	6
1 Úvod	8
2 Uvedení do problematiky	9
1.1 Základní princip radaru	9
1.2 Princip SAR interferometrie	12
3 Metodika InSAR	14
3.1 Topografická výška a rozdíl fáze	14
3.2 Výběr snímků	17
3.3 Koregistrace	18
3.4 Převzorkování	19
3.5 Tvorba interferogramu	23
3.6 Tvorba DMT	24
4 Metody hodnocení výstupů InSAR	25
4.1 Hodnocení kvality interferogramu	25
4.2 Hodnocení přesnosti DMT	26
5 Zpracování dat	27
5.1 Data a software	27
5.2 Zpracování dat	30
5.3 Koregistrace a převzorkování	32
5.4 Vytvoření interferogramu a koherenčního obrazu	34
5.5 Rozbalení fáze a vytvoření DMT	36
6 Analýza výsledků	39
6.1 Analýza vlivu interpolace na kvalitu interferogramu	39
6.2 Analýza vlivu interpolace na přesnost DMT	41
7 Diskuze metodických postupů a výsledků	48
8 Závěr	51
9 Použité zdroje a literatura	52
Seznam příloh	55

Seznam obrázků a tabulek

Tab. 2.1 Přehled mikrovlnných pásem	9
Obr. 2.1. Princip radaru	10
Obr. 2.2 Geometrie radarového zobrazení	11
Obr. 2.3 Rozlišení ve směru pohledu	12
Obr. 2.4 Rozlišení ve směru letu, SAR	12
Obr. 3.1 Geometrická konfigurace InSAR	14
Obr. 3.2 Průběh funkce Nearest Neighbor	20
Obr. 3.3 Průběh lineární interpolace	20
Obr. 3.4 Průběh funkce 6-point Cubic Convolution	21
Obr. 3.5 Průběh funkce Sinc	22
Obr. 3.6 Průběh funkce 6-point Truncated Sinc	22
Obr. 3.7 Průběh funkce 6-point Knab	22
Obr. 3.8 Průběh funkce 6-point Raised Cosine	22
Tab. 5.1 Charakteristiky produktu SAR SLC	27
Tab. 5.2 Přehled snímků SAR SLC	27
Obr. 5.1 Geografické umístění zpracovávaných snímků z ERS	28
Tab. 5.3 Vybrané parametry produktu DMR 4G	29
Obr. 5.2 Zpracovávaná oblast	30
Obr. 5.3 Zobrazení absolutní chyby (modelový posun – původní posun) ve směru azimutu a range pro interferometrickou dvojici z října 1999	33
Obr. 5.4 Zobrazení odhadovaných posunů u dvojice z října 1999	34
Obr. 5.5 Interferogram z interferometrické dvojice z října 1999 – fázová a amplitudová složka	34
Obr. 5.6 Interferogram (říjen 1999) po odečtení fáze referenčního povrchu – fázová a amplitudová složka	35
Obr. 5.7 Interferogram z interferometrické dvojice ze srpna 1999 po odečtení fáze referenčního povrchu – fázová a amplitudová složka	35
Obr. 5.8 Koherenční mapy pro interferometrické dvojice z října a srpna 1999	36

Obr. 5.9 Srovnání DMT SAR bez filtrování fáze s DMT SAR filtrovanými metodou goldstein.....	37
Tab. 6.1 Porovnání koherence pro jednotlivé interferometrické dvojice	39
Obr. 6.1. Histogramy hodnot koherence.....	40
Tab. 6.2 Porovnání sumy fázových rozdílů pro jednotlivé interferometrické dvojice	40
Obr. 6.2 DMT LLS a histogram hodnot jeho výšek	42
Obr. 6.3 DMT SAR z října 1999 a histogram hodnot jeho výšek	42
Obr. 6.4 DMT SAR z října a srpna a DMT ZABAGED	43
Tab. 6.3 Srovnání přesnosti DMT LSS a DMT ZABAGED (zdroj: vlastní výpočet).....	44
Tab. 6.4 Přesnost DMT hodnocená k DMT LLS (zdroj: vlastní výpočet).....	44
Tab. 6.5 Přesnost DMT hodnocená k DMT ZABAGED (zdroj: vlastní výpočet).....	44
Tab. 6.6 Rozdíl výšky mezi DMT SAR a referenčními DMT v určeném bodě	45
Obr. 6.5 Vybrané typy Land Cover pro zpracovávané území	45
Tab. 6.7 Analýza přesnosti DMT pro různé typy Land Cover	46
Obr. 6.7 Rastr rozdílů hodnot výšky mezi rastrem SAR a rastrem LLS.....	47
Obr. 6.8 Rastr rozdílů hodnot výšky mezi rastrem SAR a rastrem ZABAGED	47

1 Úvod

Radarová interferometrie je metoda, jejíž pomocí lze vytvářet digitální modely povrchu rozsáhlého území s přesností v řádech metrů až desítek metrů. K určení topografické výšky je potřeba dvou radarových snímků zájmového území. Přesnost této metody ovlivňuje především velikost prostorové základny. Také časová základna, topografie, krajinný pokryv, vliv atmosféry a i samotný proces zpracování mají vliv na kvalitu výsledku (Hanssen, 2001). Pro vytvoření kvalitního interferogramu je nezbytná koregistrace obou snímků se subpixelovou přesností. Tento krok je zakončen převzorkováním jednoho radarového snímku na mřížku snímku druhého. Při převzorkování se používají různé interpolační metody.

Cílem práce je posoudit vliv nejčastěji používaných interpolačních metod na reálná data (tandem ERS) a porovnat výsledky s teoretickými výpočty a simulačními studiemi z předchozích výzkumů (Hanssen, Bamler, 1999), (Migliaccio, Bruno, 2003) a (Cho ... [et al.], 2005).

Pro hodnocení vlivu interpolačních metod na kvalitu interferogramu je použito hodnocení pomocí koherence (Touzi ... [et al.], 1999) a sumy fázových rozdílů (Li, ... [et al.], 2004). Dále byla ověřována možnost hodnotit vliv interpolačních metod pomocí přesnosti DMT (Li, Bethel, 2008). Jako referenční digitální modely terénu byly použity ZABAGED a digitální model terénu z leteckého laserového skenování ČR. Přesnost DMT byla zkoumána také s ohledem na Land Cover.

Záměrem této diplomové práce je volba optimální interpolační metody v interferometrickém zpracování za účelem vytvoření digitálního modelu povrchu.

2 Uvedení do problematiky

2.1 Základní princip radaru

Dálkový průzkum Země v mikrovlnné části spektra zahrnuje poměrně rozsáhlé pásmo vlnových délek zhruba od 1 cm do 1 m. Na rozdíl od záření v optické části spektra, mikrovlnné záření je schopno prostupovat mlhou, smogem, oblaky i mírným deštěm, ale také pronikat porostem, půdou nebo sněhovou pokrývkou. Přehled standardních názvů radarových pásem s rozsahem vlnových délek je uveden v tab. 2.1. Aktivní mikrovlnné senzory jsou vybaveny vlastním zdrojem mikrovlnného záření. Díky tomu není snímání závislé na denní době (CCRS, 2007).

Záření kratších vlnových délek do 3 cm je více rozptylováno silnou oblačností a vydatným deštěm. Proto se tato pásma využívají pro zjišťování výskytu srážek. Pro dálkový průzkum Země je typické pásmo C, bylo použito u družic ERS, RADARSAT a ENVISAT. Pro družicové systémy se také používá pásmo X např. u družice TerraSAR a pásmo L u družice JERS (Kolář, 2008).

Tab. 2.1 Přehled mikrovlnných pásem (zdroj: Kolář, 2008)

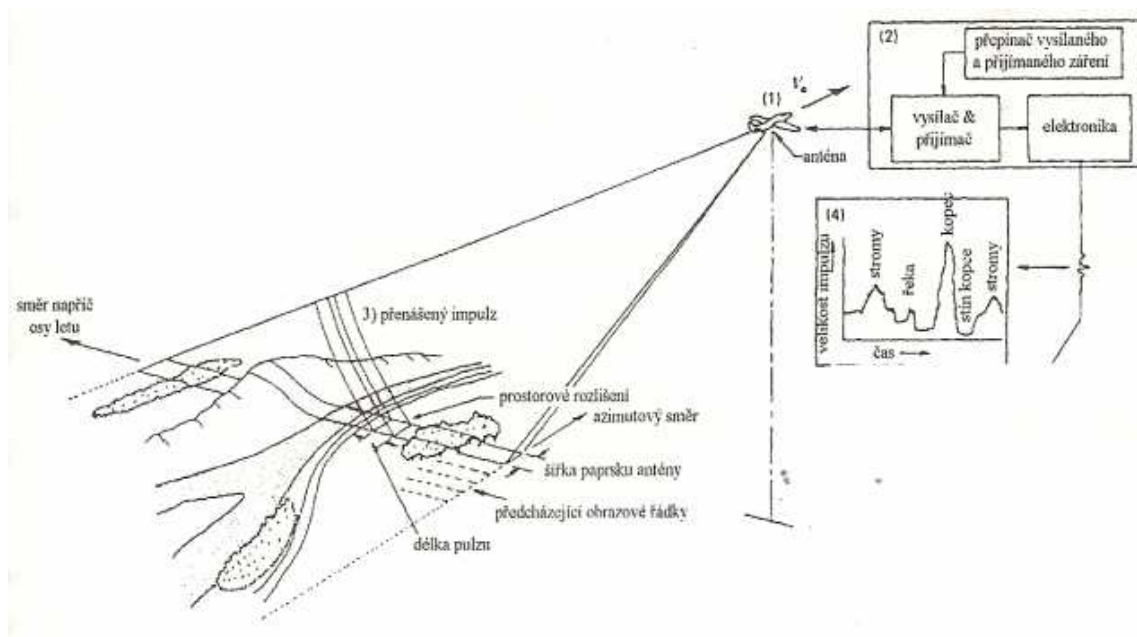
Pásmo	Vlnová délka (cm)	Frekvence (MHz)
K _a	0,75 - 1,10	40000 - 26500
K	1,1 - 1,67	26500 - 18000
K _u	1,67 - 2,40	18000 - 12500
X	2,40 - 3,75	12500 - 8000
C	3,75 - 7,50	8000 - 4000
S	7,50 - 15	4000 - 2000
L	15 - 30	2000 - 1000
P	30 - 100	1000 - 300

Radar (*RA*dio *DE*tectio*N* And *R*ang*ing*) je aktivní zobrazující mikrovlnný senzor, který vysílá přes anténu v pravidelných intervalech pulsy mikrovlnného záření. Radarové systémy používají odlišnou geometrii zobrazení – šikmý pozorovací úhel namísto vertikálního obvyklého u optických skenerů. Paprsek o šířce β je v pulsech vyslán šikmo k zemskému povrchu, ve směru kolmém na směr pohybu nosiče (obr. 2.1). Postupující vlna se dostává do interakce s povrchem a dochází k rozptylu záření. Část signálu, která se od objektů odrazí zpět k radaru je přijata anténou a zpracována tak, aby byl vytvořen videosignál amplitudy v závislosti na čase. Počítačovým zpracováním je signál rekonstruován do obrazové řádky. Při pohybu nosiče vzniká z jednotlivých řádek radarový snímek (Kolář ... [et al.], 1997).

Elektronickým měřením lze určit dobu postupu vlny od antény k odrazeči a zpět a tím i vzdálenost mezi anténou a odražečem (Kolář ... [et al.], 1997). Šikmá vzdálenost (*slant range*) mezi zdrojem záření a odražečem je vyjádřena vztahem

$$R = c \cdot t / 2 \quad (2.1.)$$

kde t je doba mezi vysláním pulsu a jeho přijetím a c rychlost světla.

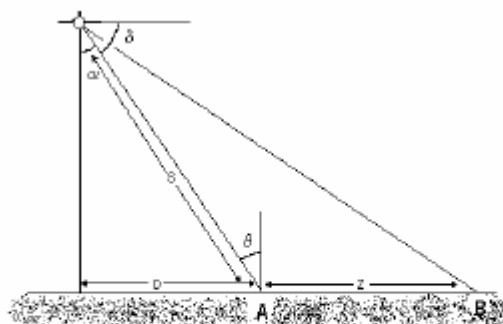


Obr. 2.1. Princip radaru (zdroj: Kolář ... [et al.], 1997)

Způsob interakce mikrovlnného záření s objekty na zemském povrchu a odrazové schopnosti objektů jsou odlišné od těchto charakteristik v optické části spektra. Mikrovlnné záření je ovlivněné jednak parametry samotného radaru (frekvence, polarizace, geometrie pohledu) a jednak parametry povrchu (typ krajinného pokryvu, topografie, reliéf). Vzhled objektu v radarovém snímku je tedy výsledkem kombinace několika proměnných, především drsností povrchu, dále pak geometrií pohledu a terénu, obsahem vlhkosti a dielektrickými vlastnostmi povrchu (CCRS, 2007).

Směr letu nosiče je nazýván směr azimutální (*azimuth*). Směr kolmý, ve kterém je vysíláno záření, je nazýván směr pohledu (*range, look direction*). Objekty, které jsou kolmé na směr pohledu, jsou zvýrazněny mnohem více, než objekty ve směru rovnoběžném se směrem pohledu. Geometrie radarového zobrazení je znázorněna na obr. 2.2. Úhel, pod kterým je záření vysíláno k zemskému povrchu, se nazývá úhel pozorování nebo úhel pohledu a značí se α . Jeho doplňkem je hloubkový úhel δ (*depression angle*), tedy úhel mezi horizontálou nosiče a pulsem vysílaným anténou. Úhel dopadu θ (*incidence angle*) je úhel mezi kolmicí k zemskému povrchu a pulsem (Jensen, 2000).

Úhel dopadu se mění v závislosti na poloze objektu v pásmu vymezeném paprskem kolmém na směr letu. Zvyšuje se směrem z oblasti blízkého dosahu (*near range*) k oblasti vzdáleného dosahu (*far range*) (CCRS, 2007).



A - oblast blízkého dosahu (near range), B - oblast vzdáleného dosahu (far range); α - úhel pohledu (look angle), δ - hloubkový úhel (depression angle), θ - úhel dopadu (incidence angle); S - šikmá vzdálenost (slant range), D - horizontální vzdálenost (ground range), Z - šířka záběru (swath)

Obr. 2.2 Geometrie radarového zobrazení (zdroj: DPZ MUNI)

Prostorové rozlišení určujeme ve dvou směrech, ve směru azimutu (*azimuth*) a ve směru pohledu (*range*). Prostorové rozlišení ve směru pohledu (R_R) je úměrné délce pulsu. Ta je vyjádřena dobou vysílání pulsu (τ) vynásobenou rychlostí světla (c). Aby bylo možné od sebe dva objekty odlišit, je nutné, aby odraz byl přijat odděleně a nedošlo k časovému překrytu mezi odrazy. Šikmé rozlišení tedy není závislé na vzdálenosti od senzoru, a je rovno polovině délky pulsu (obr. 2.3). Prostorové rozlišení R_R na zemském povrchu pak získáme převodem ze šikmé vzdálenosti na vzdálenost horizontální podle vztahu

$$R_R = (\tau \cdot c) / (2 \cdot \cos \delta) \quad (2.2.)$$

kde τ je doba trvání pulsu a δ je hloubkový úhel. Ten se ve směru napříč osy letu mění, a proto prostorové rozlišení R_R závisí na vzdálenosti od senzoru (Kolář ... [et al.], 1997).

Prostorové rozlišení ve směru azimutu (R_A) je u radarů se skutečnou aperturou (SLAR) dáno šířkou pásu na zemském povrchu, který vymezuje radarový paprsek. Úhlovou šířku paprsku β určuje vlnová délka vyslaného záření (λ) a délka antény (L_A).

$$\beta = \lambda / L_A \quad (2.3.)$$

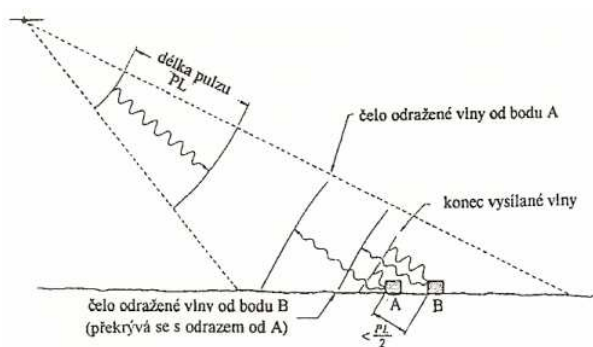
Prostorové rozlišení v azimutálním směru je pak vyjádřeno vztahem

$$R_A = R \cdot \beta \quad (2.4.)$$

kde R je šikmá vzdálenost (Kolář ... [et al.], 1997).

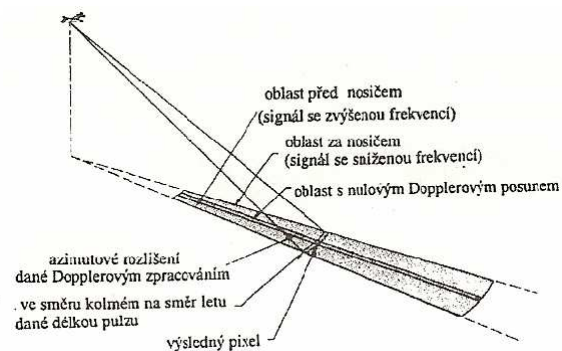
Prostorové rozlišení v azimutálním směru u radarů SAR (*Synthetic Aperture Radar*) využívá pro monitorování vracejících se vln Dopplerův posun tak, že signál je přijímán pouze z úzkého okolí středu paprsku a rozlišení zůstává konstantní po celé šířce pásu (obr. 2.4). Dopplerův posun je změna frekvence vlnové délky v závislosti na relativních rychlostech vysílače a odražeče. Odrazy od objektů před nosičem mají vyšší frekvence a za nosičem nižší než vysílané záření. Odrazy z plochy blízké ose paprsku nevykazují (téměř) žádný posun

frekvencí. S ohledem na velikost posunu frekvencí se tak zpracovávají se odrazy pouze z úzké šířky paprsku (Kolář ... [et al.], 1997).



Obr. 2.3 Rozlišení ve směru pohledu

(zdroj: Kolář ... [et al.], 1997)



Obr. 2.4 Rozlišení ve směru letu, SAR

(zdroj: Kolář ... [et al.], 1997)

Radar měří délky v šikmém směru. Tato geometrie zobrazení způsobuje měřítkovou distorzi v šikmém směru. Měřítko snímku se mění. Objekty v oblasti blízkého dosahu se jeví zkráceně, oproti objektům v oblasti vzdáleného dosahu. Aby objekty měly skutečný geometrický tvar a bylo možné správně měřit vzdálenosti mezi nimi, je nutné provést transformaci snímku, vyjádřeného v šikmých vzdálenostech, do snímku ve skutečných pozemních vzdálenostech. Pro správný výpočet je nutné použít digitální výškový model terénu (CCRS, 2007).

Poziční chyby způsobené nerovnostmi terénu se vyskytují téměř ve všech radarových snímcích. Vyskytují se ve směru pohledu. Jedná se především o zkrácení (*foreshortening*), překryv (*layover*) a stín (*shadowing*). Je-li terén plochý, je snadné převést zobrazení ze šikmých výšek na pozemní. Vyskytují-li se však v terénu stromy, vysoké budovy či hory, objevují se horizontální posuny reliéfu a objektů. Jsou způsobeny výškou objektů. Vysoké objekty jsou blíže k anténě radaru, odraz je od nich přijat dříve, což vede ke zkrácení nebo překryvu (Jensen, 2000).

2.2. Princip SAR interferometrie

Radarová interferometrie (InSAR, IFSAR) je metoda, jejíž pomocí lze tvořit digitální modely povrchu (DMT) a měřit jejich změny v čase. Radarový snímek obsahuje kromě amplitudové složky také složku fázovou. Amplitudová složka nese informaci o intenzitě odraženého záření a vypovídá tak o odrazivých vlastnostech povrchu. Radarová interferometrie využívá principu porovnání fázové složky odraženého záření mezi odpovídajícími si pixely hlavního a podřízeného radarového snímku pro vytvoření interferogramu a tím pro zjištění relativního výškového členění terénu daného území. Pomocí fázové složky tak lze odvozovat digitální modely povrchu, které se využívají v celé řadě

aplikací, a měřit jejich změny v čase. Použití radaru umožňuje tvorbu digitálních modelů povrchu nezávisle na denní době (Richards, 2007).

Tato metoda má velmi vysoké požadavky jak na přesnost geometrického zobrazení, tak na přesnost interferometrického zpracování radarových dat (Hanssen, 2001).

Zpracování za účelem vytvoření digitálního modelu povrchu můžeme rozdělit do tří částí. První část tvoří koregistrace a převzorkování, při kterém je vedlejší radarový snímek polohově sjednocen s hlavním radarovým snímkem. Druhou část představuje výpočet komplexního interferogramu a koherenční mapy. Poslední částí zpracování je rozbalení fáze a vytvoření digitálního modelu povrchu.

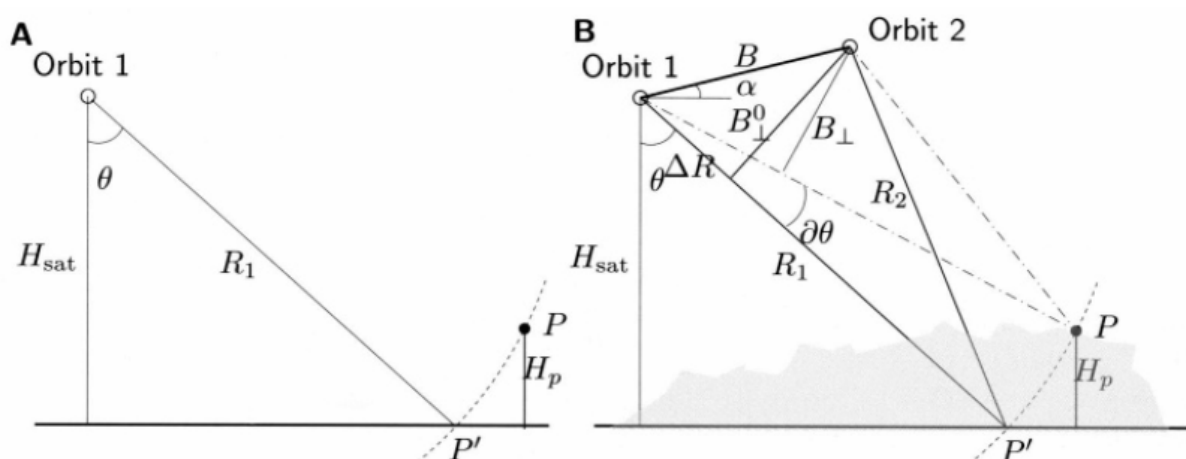
Podle terminologického slovníku zeměměřictví a katastru nemovitostí (VUGTK) je *digitální model povrchu* definován jako zvláštní případ digitálního modelu reliéfu, který zobrazuje povrch terénu a vrchní plochy všech objektů na něm (střechy, koruny stromů apod.). *Digitální model reliéfu / terénu* je pak definován jako digitální reprezentace zemského povrchu v paměti počítače, složená z dat a interpolačního algoritmu, který umožňuje mj. odvozovat výšky mezilehlých bodů.

V této práci je název *digitální model terénu* brán jako obecný název pro datové soubory obsahující údaje o výškopisu daného území, tedy i pro digitální model povrchu a je použita zkratka DMT.

3 Metodika InSAR

3.1 Topografická výška a rozdíl fáze

Měření vzdálenosti pomocí jednoho detektoru není schopno rozlišit dva body (P a P') ve stejné vzdálenosti od senzoru, ale rozdílné vzdálenosti měřené na zemském povrchu (obr. 3.1 A). Tento problém může být vyřešen sledováním změny úhlu mezi bodem na referenčním tělese P' a bodem P ve výšce H_p nad tímto referenčním tělesem ve stejné vzdálenosti od senzoru R_1 . Metoda radarové interferometrie to umožňuje pomocí sledování obou bodů z mírně odlišné geometrie. Vzdálenost mezi dvěma senzory se nazývá prostorová základna a značí se B . Vzdálenost mezi dvěma senzory, kolmá na směr pohledu, se nazývá kolmá nebo efektivní základna B_{\perp} . Radar neumožňuje sledovat přímo změnu úhlu, proto musí být tato informace odvozena z délkových měření dvou senzorů (obr. 3.1 B). Základem radarové interferometrie je proto určení rozdílů ve vzdálenosti k danému bodu měřené ze dvou senzorů. To je možné pomocí určení fázových rozdílů odraženého záření (Hanssen, 2001).



Obr. 3.1 Geometrická konfigurace InSAR (zdroj: Hanssen, 2001)

H_{sat} je výška družice nad referenčním povrchem, H_p je výška bodu nad referenčním povrchem, R_1 a R_2 je vzdálenost daného bodu od detektoru, B je prostorová základna, B_{\perp} je kolmá základna, θ je úhel pohledu, $\partial\theta$ je změna úhlu pohledu

Pomineme-li vliv atmosféry na šíření signálu, můžeme sledovanou fázi z jedné rozlišovací buňky vyjádřit jako součet fáze úměrné vzdálenosti a fáze způsobené odrazivými vlastnostmi buňky. Druhá z nich má nepředvídatelnou velikost, pokud však budeme vycházet z předpokladu, že měření bude opakováno za stejných podmínek, fáze úměrná odrazivým vlastnostem buňky bude stejná jako u prvního měření. Za těchto podmínek konstatujeme, že zobrazení je koherentní. Stupeň koherence pak slouží jako míra podobnosti mezi dvěma pozorováními. Rozdíl fází mezi dvěma senzory koherentního systému je pak tedy závislý pouze na rozdílu vzdálenosti (Hanssen, 2001).

Pokud nejsou snímky pořízeny v jeden okamžik, hovoříme o takzvané časové základně. Ta může v důsledku změny počasí, vegetace nebo lidské činnosti způsobit změnu odrazových charakteristik buňky, což ovlivňuje míru koherence až po úplnou dekorelaci (Hanssen, 2001).

Radarový snímek y představuje pravidelnou mřížku komplexních hodnot, které mohou být rozloženy na složku amplitudovou a složku fázovou.

$$y = |y| \exp(j\varphi) \quad (3.1)$$

Komplexním násobením odpovídajících si pixelů hlavního a vedlejšího radarového snímku vzniká interferogram v .

$$v = y_1 y_2^* = |y_1| |y_2| \exp(j(\varphi_1 - \varphi_2)) \quad (3.2)$$

Hodnotu fáze buňky P můžeme vyjádřit jako součet fáze úměrné vzdálenosti a fáze způsobené odrazivými vlastnostmi buňky

$$\varphi_P = -\frac{2\pi 2R}{\lambda} + \varphi_{scat,P} \quad (3.3)$$

kde R je šikmá vzdálenost odražeče od senzoru a λ vlnová délka záření.

Pokud $\varphi_{scat,1P} = \varphi_{scat,2P}$, interferometrická fáze je

$$\phi_P = \varphi_{1P} - \varphi_{2P} = -\frac{4\pi(R_1 - R_2)}{\lambda} = -\frac{4\pi\Delta R}{\lambda} \quad (3.4)$$

a její derivace je
$$\partial\phi_P = -\frac{4\pi}{\lambda} \partial\Delta R \quad (3.5)$$

Rozdíl délek ΔR může být aproximován jako

$$\Delta R = B \sin(\theta - \alpha) \quad (3.6)$$

Tato aproximace je známá jako *far-field* nebo *parallel-ray*. Kvůli fázové nejednoznačnosti 2π (*phase ambiguity*) a orbitálním nepřesnostem však není možné ΔR odvodit. Nicméně vztah mezi ΔR a θ můžeme vyjádřit jako

$$\partial\Delta R = B \cos(\theta^0 - \alpha) \partial\theta \quad (3.7)$$

kde θ^0 je hodnota úhlu pohledu pro referenční povrch.

Vztah mezi změnou interferometrické fáze a změnou úhlu pohledu θ pak můžeme vyjádřit jako

$$\partial\phi_p = -\frac{4\pi}{\lambda} B \cos(\theta^0 - \alpha) \partial\theta \quad (3.8.)$$

Změna interferometrické fáze tak může být definována jako rozdíl mezi naměřenou fází a fází očekávanou pro referenční těleso.

Výška družice nad referenčním tělesem je známa a může být vyjádřena jako

$$H = R_1 \cos \theta \quad (3.9.)$$

Viz obr. 3.1 B. Odtud pak pro buňku P v šikmé vzdálenosti R_{1P} vyplývá vztah mezi změnou úhlu pohledu v závislosti na změně výšky ∂H

$$\partial H = -H_p = -R_{1P} \sin \theta_p^0 \partial\theta \quad (3.10.)$$

Vztah mezi výškou bodu H_p nad referenčním tělesem a rozdílem fáze $\partial\phi_p$ je pak

$$\boxed{H_p = \frac{\lambda R_{1P} \sin \theta_p^0}{4\pi B_{\perp,P}^0} \partial\phi_p} \quad (3.11.)$$

kde $B_{\perp,P}^0 = B \cos(\theta_p^0 - \alpha)$

pro $\partial\phi = 2\pi$ pak můžeme odvodit výšku *ambiguity*, což je výškový rozdíl, který odpovídá fázovému rozdílu o velikosti 2π

$$h_{2\pi} = \left| \frac{\lambda R_{1,P} \sin \theta_p^0}{2B_{\perp,P}^0} \right| \quad (3.12.)$$

Pro družice ERS s parametry $\lambda = 5,6$ cm, $\theta = 23^\circ$ a $R = 850$ km je výška ambiguity rovna přibližně

$$h_a \approx \frac{9300}{B_{\perp}} \quad (3.13.)$$

Vztah mezi rozdílem fáze a topografickou výškou je odvozen podle Hanssen (2001).

3.2 Výběr snímků

Výběr snímků je jedním z nejdůležitějších rozhodnutí. Kritéria výběru mají velký vliv na kvalitu výsledku. Závisí na účelu, pro který budou data dále využita. Kritéria výběru se liší pro vytváření DMT a pro diferenciální interferometrii. Kromě typu senzoru a dostupnosti dat jsou základními parametry především časová a prostorová základna, typ terénu a meteorologické podmínky v okamžiku pořizování snímků (Hanssen, 2001).

Typ senzoru zahrnuje důležité charakteristiky, jako je vlnová délka, šířka pásu, SNR (*Signal to Noise Ratio* – poměr signálu k šumu), sklon oběžné dráhy a periodu snímkování. Pro družicovou interferometrii se využívají pásma X až L (tab. 2.1.). Delší vlnové délky bývají ovlivněny ionosférou, zatímco kratší jsou příliš citlivé k počasí (Hanssen, 2001). SAR družic ERS vysílá pulsy o vlnové délce 5,6 cm a frekvenci 5300 MHz a spadá tak do pásma C. Snímky družic ERS jsou proto vhodné pro interferometrické zpracování. Dostupnost dat družic ERS je možné zjistit pomocí software EOLI-SA a software DESCW. Tyto softwary umožňují získat informace také o prostorové a časové základně mezi snímky a umožňují tak vybrat vhodná data.

Prostorová základna ovlivňuje citlivost k topografické výšce (viz výška ambiguity), velikost dekorelace a efektivnost rozbalení fáze. Pro topografické mapování bývá, podle typu terénu, vhodná kolmá základna mezi 100 – 500 m (Hanssen, 2001). Podle Ferrettiho ... [et al.] (2007) jdou interferogramy s krátkou kolmou základnou (< 30 m) sice snadněji rozbalit, ale jsou nepoužitelné kvůli jejich vysoké citlivosti na fázový šum a vliv atmosféry. Interferogramy s prostorovou základnou větší než 450 m je téměř nemožné rozbalit, pokud předem není k dispozici jiný DMT a pokud topografie reliéfu zájmového území není rovinná. Koherence je navíc velmi nízká v důsledku rozdílů v geometrii a násobnému rozptylu. Optimální kolmá základna je v rozmezí mezi 150 a 300 metrů.

Pro topografické mapování je doporučeno vybrat co možná nejmenší časovou základnu, aby se minimalizoval vliv časové dekorelace. Družice ERS-1 a ERS-2 v misi tandem pořizovaly mezi lety 1995 až 2000 snímky stejného území s odstupem jednoho dne.

Charakteristiky terénu, které ovlivňují interferometrické zpracování, jsou drsnost terénu, převýšení, typ a množství vegetace a antropogenní činnosti. První dvě charakteristiky mají vliv na výběr družice a kolmé základny, druhé dvě pak ovlivňují velikost dekorelace. Pro minimalizaci vlivu sezónních efektů, jako je sníh nebo opadávání listů ze stromů, je vhodné vybírat snímky ze stejného ročního období (Hanssen, 2001). Snímky území pokrytého vegetací vykazují vyšší koherenci, jsou-li pořizena během suchého období (Ferretti ... [et al.], 2007).

Koherence je ovlivněna také meteorologickými podmínkami při pořizení snímků. Sníh, déšť nebo silný vítr způsobují snížení koherence. Vliv stavu atmosféry je patrný také u

snímků pořízených ve velmi horkých dnech. Horký vzduch totiž může obsahovat mnohem více vodní páry než vzduch chladný (Ferretti ... [et al.], 2007). Snímky pořízené v noci bývají obvykle méně postiženy atmosférickými vlivy (Hanssen, 2001).

3.2 Koregistrace

Odvození výšky pomocí metody InSAR závisí na rozdílu fáze odpovídajících si pixelů ze dvou snímků. Snímky jsou pořízeny z mírně odlišné geometrie, což vede k mírné deformaci (distorzi) mezi snímky, proto se používá tzv. koregistrace snímků, která transformuje vedlejší snímek na hlavní (Richards, 2007).

V ideálním případě, kdy by dráhy družic byly dokonale paralelní a snímky srovnané, by koregistrace znamenala jen opravu geometrie kvůli rozdílnému úhlu pohledu. Během pořizování dat však může docházet také s odchylování a natáčení drah, změnám výšky a rychlosti družic a posunům ve směru letu i ve směru pohledu (Ferretti ... [et al.], 2007). Mezi dvěma snímky může, kvůli času počátku a konce snímkování, docházet k posunu ve směru letu až v řádech tisíců řádků. Ve směru pohledu může v závislosti na velikosti prostorové základny docházet k posunu v řádech desítek pixelů (Hanssen, 2001).

Koregistrace tak představuje zásadní krok pro správné určení fázového rozdílu a redukci šumu. Aby výstupy dosahovaly vysoké kvality je nutné snímky koregistrovat se subpixelovou přesností (Richards, 2007). Obvykle se tento proces rozděluje na dva kroky. Nejprve je provedena tzv. hrubá koregistrace s přesností několika pixelů, po níž následuje tzv. jemná koregistrace pro dosažení subpixelové přesnosti.

Hrubá koregistrace představuje hrubé vyrovnání a posunutí vedlejšího snímku. Bývá provedena pomocí parametrů drah družic a hledání shodných bodů pomocí korelace na pixelové úrovni. Na základě vypočteného posunu ve směru azimutu a ve směru *range* je vedlejší snímek posunut (Hanssen, 2001).

Jemná koregistrace se subpixelovou přesností zahrnuje hledání shodných bodů na subpixelové úrovni, sestavení transformačních rovnic a převzorkování vedlejšího snímku (Li, Bethel, 2008). Pro velké množství malých oken se na pixelové úrovni určí shodné body pomocí maximální korelace (stejně jako u hrubé koregistrace). Blízké okolí těchto maxim je nadvzorkováno (v prostorové nebo ve frekvenční doméně), aby byla nalezena maxima na subpixelové úrovni. Na základě posunových vektorů jsou vypočteny parametry transformačních rovnic (polynomů 2. řádu). Tyto rovnice určují vztah mezi vedlejším snímkem a hlavním snímkem, který představuje korigovaný obraz. Po vyjádření transformační funkce dojde k procesu převzorkování vedlejšího snímku na mřížku snímku hlavního. Během celé koregistrace je posouván a převzorkován pouze vedlejší snímek.

3.3 Převzorkování

Proces převzorkování je způsob přenosu informace o hodnotách pixelů z původního snímku do snímku korigovaného (Kolář ... [et al.], 1997). Implementace může být různá, ale obvykle může být proces převzorkování rozdělen do 2 kroků (Hanssen, 2001). Nejprve je pomocí interpolace provedena rekonstrukce spojitého signálu z jeho vzorků. Poté je tento signál znovu vzorkován do nové mřížky odpovídající hlavnímu snímku.

Na základě inverzních transformačních rovnic, které byly určeny při jemné koregistraci, je pro korigovaný pixel zpětně spočtena poloha v původním snímku, ta však neodpovídá celočíselným pixelovým souřadnicím. O který pixel se tak jedná je nutno určit pomocí přiřazení nebo interpolační funkce.

Interpolační funkce dopočítávají neznámé hodnoty určitého atributu v zadaných bodech na základě známých hodnot v okolních bodech (Kolář, 2003). Na výběru interpolační funkce (a délky okna L) závisí přesnost a časová náročnost interpolace (Hanssen, 2001).

Převzorkování probíhá v okně, které se pohybuje nad oblastí překrytu obou SAR snímků. Tomuto oknu se říká plovoucí okno, anebo též *kernel*. Protože hodnota pixelu v korigovaném snímku je určena pomocí interpolace, mluvíme o tzv. *interpolačním kernelu*. Interpolace je prováděna ve frekvenční doméně. Pro převod se využívá Fourierova transformace.

Kvalitu interferogramu ovlivňuje při jeho zpracování řada vlivů, což se projevuje i na chybách ve výsledném DMT. Jedním ze zdrojů těchto chyb je také převzorkování. Interpolační chyby vznikají v důsledku oříznutí frekvenčního spektra při vzorkování a jevu zvanému *aliasing* (Hanssen, 2001).

Pro vzorkování platí pravidlo (Nyquistovo kritérium, Shannonův vzorkovací teorém), že data musí být vzorkována frekvencí f_v , která je alespoň 2x větší než nejvyšší frekvence v datech. Pokud není vzorkovací frekvence dostatečně vysoká, dochází k podvzorkování a vznikají artefakty (aliasy). *Alias* je vada v navzorkovaném obrazu (artefakt) způsobená podvzorkováním a *aliasing* je pojem pro vznik artefaktů v důsledku vzorkování. Podvzorkování způsobuje zobrazení vysokých frekvencí do nízkých a tak vznik vizuálně rušivých artefaktů (Hrádek, 2002).

Pro správné odečtení fáze a vytvoření kvalitního interferogramu je důležité, aby přesnost koregistrace byla alespoň 1/8 pixelu (Hanssen, 2001). Richards (2007) uvádí požadavek na přesnost až 1/20 pixelu. Podle zvolené přesnosti koregistrace jsou pixely vedlejšího snímku v kernelu nadvzorkovány. Hodnota těchto nadvzorkovaných pixelů je stanovena pomocí interpolační funkce. Zadá se tedy matematický předpis, který buď přiřadí hodnotu z původního snímku, nebo vypočte novou hodnotu pixelu z původních okolních hodnot. Pro každý pixel z oblasti překrytu obou snímků (odpovídající mřížce hlavního

snímku) je tak pomocí inverzní transformace a interpolace určena nová hodnota pixelu. Tím je vedlejší snímek převzorkován na mřížku hlavního snímku. Po ukončení převzorkování následuje vytvoření interferogramu.

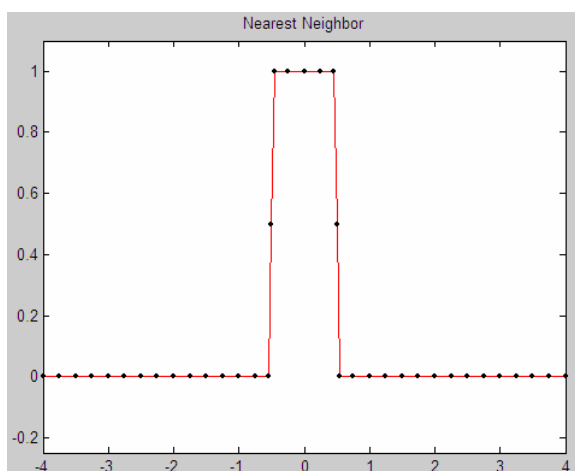
Pro převzorkování vedlejšího snímku se obvykle používá jedna z následujících interpolačních metod: *Nearest Neighbor*, *Bilinear interpolation*, *Cubic Convolution*, *Truncated Sinc*, *Knab interpolation kernel* a *Raised Cosine interpolation kernel*.

Interpolační funkce *Nearest Neighbor* pracuje na principu nejbližšího souseda. Tato metoda je definována podle rovnice 3.14. (Hanssen, Bamler, 1999). Hodnota v pixelu se nepřepočítává, pouze se přebírá hodnota nejbližšího pixelu. Výhodou této metody je hlavně její rychlost a jednoduchost. Tato metoda zachovává nezměněné (nijak nepřepočtené) hodnoty z původního snímku. U dalších interpolačních metod dochází k výpočtu nové hodnoty pixelu, a tím ke změně původních hodnot (PCI Geomatics, 2000). Výsledné hodnoty nenavazují spojitě, ve vzdálenosti poloviny pixelu se náhle mění. Na obr. 3.2 je znázorněn průběh funkce *Nearest Neighbor* pro jednorozměrná data.

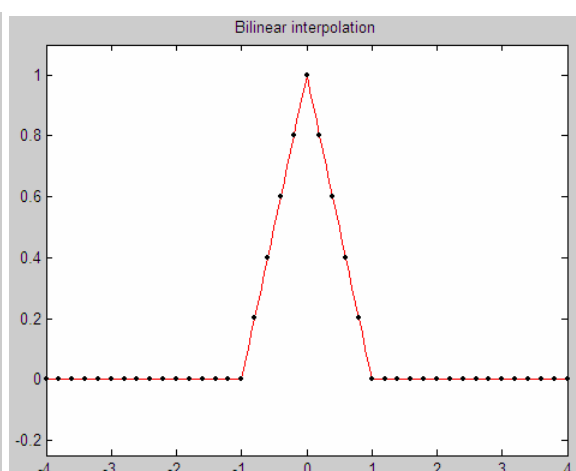
$$i(x) = \text{rect}(x) = \begin{cases} 0 & |x| > 0,5 \\ 0,5 & |x| = 0,5 \\ 1 & |x| < 0,5 \end{cases} \quad (3.14.)$$

Interpolační funkce *Bilinear interpolation* používá pro výpočet nové hodnoty pixelu vážený průměr 4 nejbližších pixelů. Matematicky je tato funkce definována podle rovnice 3.15. (Hanssen, Bamler, 1999). Nedochází k náhlým změnám hodnot, jako u předchozí metody, přechod mezi hodnotami je lineární. Tato interpolace je 3-4× časově náročnější, než interpolace *Nearest Neighbor* (PCI Geomatics, 2000). Ukázka průběhu lineární interpolace je na obr. 3.3.

$$i(x) = \text{tri}(x) = \begin{cases} 0 & |x| > 1 \\ 1 - |x| & |x| < 1 \end{cases} \quad (3.15.)$$



Obr. 3.2 Průběh funkce *Nearest Neighbor*
(zpracováno v programu MATLAB)

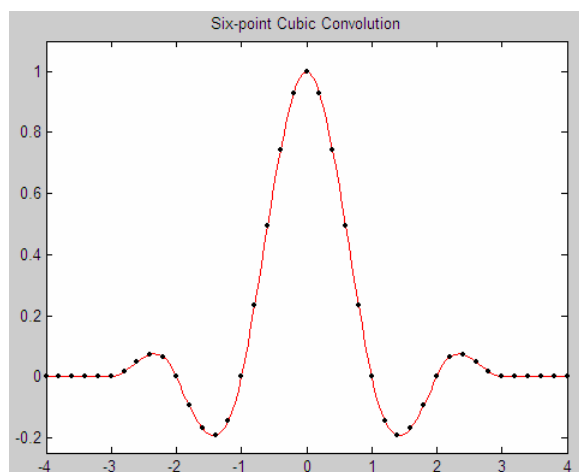


Obr. 3.3 Průběh lineární interpolace
(zpracováno v programu MATLAB)

Pomocí interpolační funkce *6-point Cubic Convolution* je nová hodnota pixelu určena z okolí 6×6 pixelů. Definice metody je rovnice 3.16. (Hanssen, Bamler, 1999). Přechod mezi výslednými hodnotami je vyhlazený. Tato metoda již patří mezi časově náročnější metody. PCI Geomatics (PCI Geomatics, 2000) uvádí, že je časově $10\times$ náročnější než metoda *Nearest Neighbor*. Příklad interpolační funkce pro jednorozměrná data je uveden na obr. 3.4.

$$i(x) = \begin{cases} (\alpha - \beta + 2)|x|^3 - (\alpha - \beta + 3)|x|^2 + 1 & 0 \leq |x| < 1 \\ \alpha|x|^3 - (5\alpha - \beta)|x|^2 + (8\alpha - 3\beta)|x| - (4\alpha - 2\beta) & 1 \leq |x| < 2 \\ \beta|x|^3 - (8\beta)|x|^2 + (21\beta)|x| - (18\beta) & 2 \leq |x| < 3 \\ 0 & 3 \leq |x| \end{cases} \quad (3.16)$$

kde $\alpha = -0,5$ a $\beta = 0,5$ (Hanssen, Bamler, 1999).



Obr. 3.4 Průběh funkce 6-point Cubic Convolution

(zpracováno v programu MATLAB)

Oblast, ze které je nová hodnota pixelu vypočtena, vymezuje parametr *délka okna* (L). Pro $L = 6$ je nová hodnota vypočtena z 36 nejbližších pixelů. Tento parametr se často objevuje v názvu funkce (např. *6-point*).

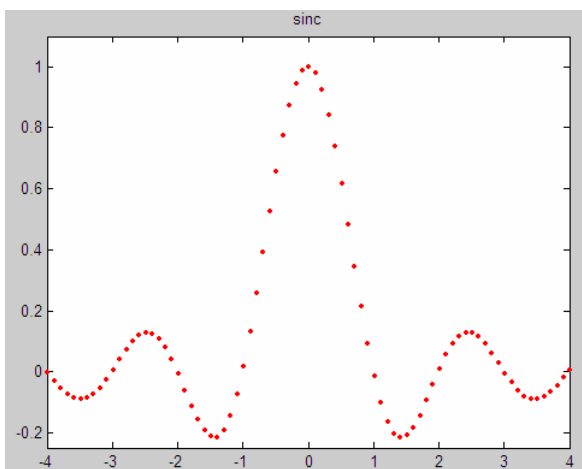
Další interpolační funkce berou v úvahu Shannonův vzorkovací teorém, že je možná přesná rekonstrukce spojitého, frekvenčně omezeného, signálu z jeho vzorků. Takovýto interpolační kernel by vyjadřovala rovnice 3.17. (Quegan, 1999). Na obr. 3.5 je znázorněn průběh funkce *sinc*.

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin \pi x}{\pi x} \quad (3.17.)$$

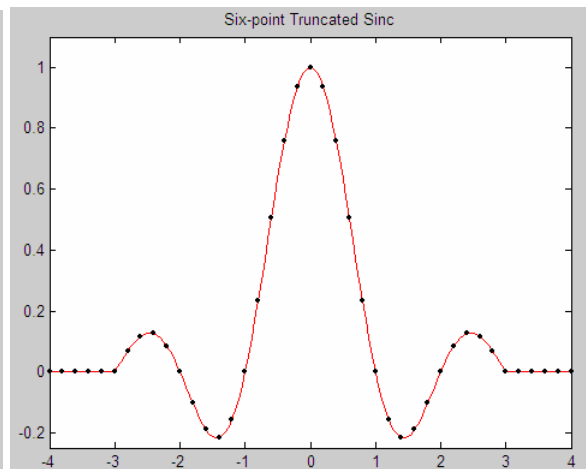
Ve skutečnosti však může být tato oscilující funkce použita pouze omezená na daný interval. Následující interpolační metody nabízí sub-optimální realizovatelná řešení. PCI Geomatics (PCI Geomatics, 2000) uvádí časovou náročnost (pro $L = 8$) 20-40× vyšší než u interpolace *Nearest Neighbor*.

Interpolační metoda *Truncated Sinc* je definována rovnicí 3.18. (Hanssen, Bamler, 1999). Funkce *sinc* je omezena v závislosti na zvolené délce okna (L). Pro jednorozměrná data, pro délku okna $L = 6$ je průběh funkce znázorněn na obr. 3.6.

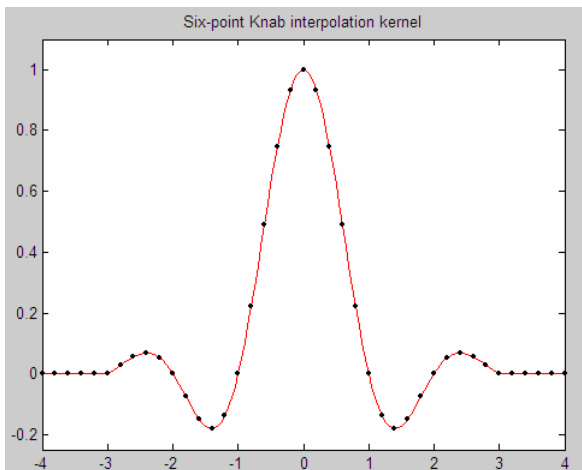
$$i(x) = \text{sinc}(x) \text{rect}\left(\frac{x}{L}\right) \quad (3.18.)$$



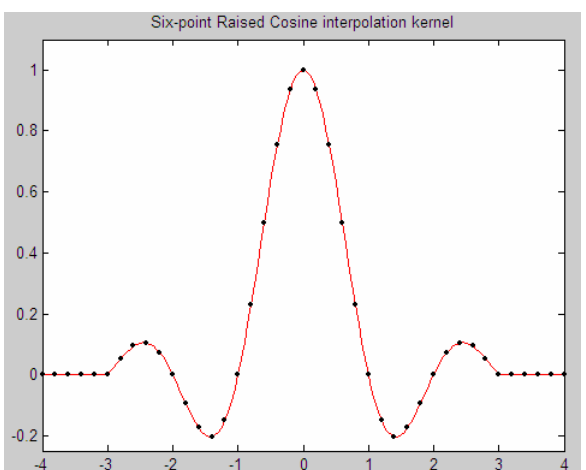
Obr. 3.5 Průběh funkce Sinc
(zpracováno v programu MATLAB)



Obr. 3.6 Průběh funkce 6-point Truncated Sinc
(zpracováno v programu MATLAB)



Obr. 3.7 Průběh funkce 6-point Knab
(zpracováno v programu MATLAB)



Obr. 3.8 Průběh funkce 6-point Raised Cosine
(zpracováno v programu MATLAB)

Funkce *Knab interpolation kernel* je matematicky definována vztahem 3.19. (Migliaccio, Bruno, 2003).

$$i(x) = \text{sinc}(x) \frac{\cosh(\alpha\pi M \sqrt{1 - \left(\frac{x}{M}\right)^2})}{\cosh(\alpha\pi M)} \quad (3.19)$$

kde $\alpha = 1 - \frac{1}{\chi}$, kde χ je ukazatel míry nadvzorkování (*oversampling ratio*), pro družice ERS je $\chi = 1,223$ (Hanssen, Bamler, 1999), a délka okna $L = 2M$.

Pro jednorozměrná data, pro $L = 6$, $\chi = 1,223$ je průběh funkce znázorněn na obr. 3.7.

Raised Cosine interpolation kernel je definován vztahem 3.20. (Cho ... [et al.], 2005).

$$i(x) = \text{sinc}(x) \frac{\cos(\alpha\pi x)}{1 - 4\alpha^2 x^2} \text{rect}\left(\frac{x}{L}\right) \quad (3.20.)$$

kde $\alpha = 1 - \frac{1}{\chi}$, kde χ je ukazatel míry nadvzorkování (*oversampling ratio*), pro družice ERS je $\chi = 1,223$ (Hanssen, Bamler, 1999), a L je délka okna.

Na obr. 3.8 je znázorněn průběh funkce pro jednorozměrná data, pro $L = 6$, $\chi = 1,223$.

Rovnice interpolací po převodu do frekvenční domény (pokud takovéto analytické vyjádření existuje) jsou uvedeny v citované literatuře.

Obecně lze říci, že správnost výsledků interpolační funkce závisí na přesnosti a počtu známých hodnot, na prostorovém rozložení bodů, ze kterých se hodnoty pro interpolační výpočet použijí a na tom, jak vhodně popisuje použitá matematická funkce průběh hodnot interpolovaného atributu v okolí výchozího bodu. Čím je interpolační funkce složitější, tím je její použití časově náročnější, ale nemusí vždy poskytnout přesnější výsledek (Kolář, 2003).

3.4 Tvorba interferogramu

Interferogram je vytvořen komplexním násobením odpovídajících si pixelů obou snímků (rovnice 3.2.) při kterém dochází k násobení amplitud a odečítání fází. Fáze interferogramu je tak tvořena rozdílem hodnot fází obou snímků. Změna hodnot fáze o 2π je představována tzv. interferometrickým proužkem. Změna výšky terénu odpovídající jednomu interferometrickému proužku (tzv. výška *ambiguity*) lze určit podle rovnice 3.12.

Pro snížení fázového šumu je možné aplikovat tzv. *multilook*, při kterém je interferogram pro zadanou velikost okna průměrován. Často bývá aplikován poměr 5 : 1 (pro směr azimutu : *range*) pro dosažení přibližně čtvercových pixelů. Při aplikaci metody *multilook* se zvyšuje poměr signálu k šumu, ale snižuje se rozlišení (Hanssen, 2001).

3.5 Tvorba DMT

Rozbalení fáze interferogramu je jedním z nejsložitějších problémů radarové interferometrie. Je zaznamenáván pouze doměrek fáze, což je hodnota v intervalu od $-\pi$ do π . Počet celých cyklů není znám. Proces rozbalení fáze přiřazuje jednotlivým interferometrickým proužkům počet cyklů. Rozbalená fáze pak může být převedena na topografickou výšku a georeferencována. Tato problematika není v rámci této diplomové práce řešena. Více informací je možné nalézt například v Hanssen (2001).

4 Metody hodnocení výstupů InSAR

4.1 Hodnocení kvality interferogramu

Kvalita interferogramu může být hodnocena pomocí koherence (Touzi ... [et al.], 1999) a sumy fázových rozdílů (Li ... [et al.], 2004).

Koherence

Často používaným ukazatelem kvality interferogramu je koherence mezi dvěma radarovými snímky. Koherenci lze definovat jako korelační koeficient mezi dvěma odpovídajícími si pixely. Její hodnota se pohybuje od 0 do 1. Čím je koherence vyšší, tím vyšší je kvalita interferogramu.

Definice koherence (Touzi ... [et al.], 1999) mezi dvěma komplexními snímky y_1 a y_2

$$\Delta = \frac{E(y_1 y_2^*)}{\sqrt{E(|y_1|^2)} \sqrt{E(|y_2|^2)}} \quad (4.1.)$$

kde $E(x)$ je střední hodnota x .

Magnituda (velikost koherence) je značena $|\Delta|$ a nazývá se stupeň koherence.

Výběrová koherence pro L nezávislých měření je

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^L y_{1i} y_{2i}^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^L |y_{1i}|^2} \sqrt{\sum_{i=1}^L |y_{2i}|^2}} \quad (4.2.)$$

Zvýšením počtu nezávislých měření L (počet pohledů - *multilook*) dochází ke snížení zkreslení odhadu velikosti koherence (pro L dostatečně velké). Pomocí pohyblivého okna N v rámci kterého může být daný proces považován za lokálně stabilní (N dostatečně malé) může být vypočtena *průměrná koherence* (rovnice 4.3.) prostorovým průměrováním hodnot v okolí daného pixelu (Grimala, 2006). Tím je vypočtena koherenční mapa. Pro kvantitativní hodnocení koherenčních map může sloužit výpočet střední hodnoty a směrodatné odchylky.

$$\bar{\delta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta \quad (4.3.)$$

Suma fázových rozdílů

Jiným způsobem určení kvality interferogramu je metoda založená na fázových rozdílech (Li ... [et al.], 2004). Pixely interferogramu obsahují hodnoty fázových rozdílů. V dokonalém interferogramu by fázová změna měla probíhat postupně, proto fázový rozdíl sousedních pixelů by měl být malý ($SPD_{x,y}$). To znamená, že i suma všech fázových rozdílů (SPD) by měla být malá. Čím nižší je potom suma fázových rozdílů, tím větší by měla být kvalita interferogramu.

$$SPD_{x,y} = \sum_{l=1}^1 \sum_{k=1}^1 |\phi_{x,y} - \phi_{x+l,y+k}| \quad (4.4.)$$

kde $\phi_{x,y}$ je interferometrická fáze korigovaná o vliv referenční fáze.

$$SPD = \sum_{x=0}^{p-1} \sum_{y=0}^{q-1} SPD_{x,y} \quad (4.5.)$$

4.2 Hodnocení přesnosti DMT

Li a Bethel (2008) uvádějí, že koherence není vždy nejlepším kritériem pro odhad vlivu převzorkování a hlavním standardem pro hodnocení převzorkování i celého InSAR zpracování by měla být přesnost výsledného DMT. Přesnost DMT lze hodnotit pomocí směrodatné odchylky rozdílů výšky (DMT SAR – referenční DMT) podle rovnice 4.6.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.6.)$$

$$\text{kde } \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (4.7.)$$

Výšková přesnost referenčního digitálního modelu terénu musí být alespoň 3× vyšší než přesnost porovnávaného DMT (Höhle, 2009). DMT SAR obvykle dosahují výškové přesnosti v řádech metrů až desítek metrů.

5 Zpracování dat

5.1 Data a software

Data

SAR SLC (*Single Look Complex*)

Produkt SAR SLC (ERS.SAR.SLC / SAR_IMS_1P) představuje zpracované snímky z družic ERS v šikmém pohledu, které zachovávají hodnoty fáze. Charakteristiky produktu jsou uvedeny v tab. 5.1. Na data bylo použito minimum korekcí. Tento produkt je vytvářený a určený pro interferometrické aplikace, dále pro kalibraci a kvalitativní hodnocení SAR.

Tab. 5.1 Charakteristiky produktu SAR SLC (zdroj: ESA)

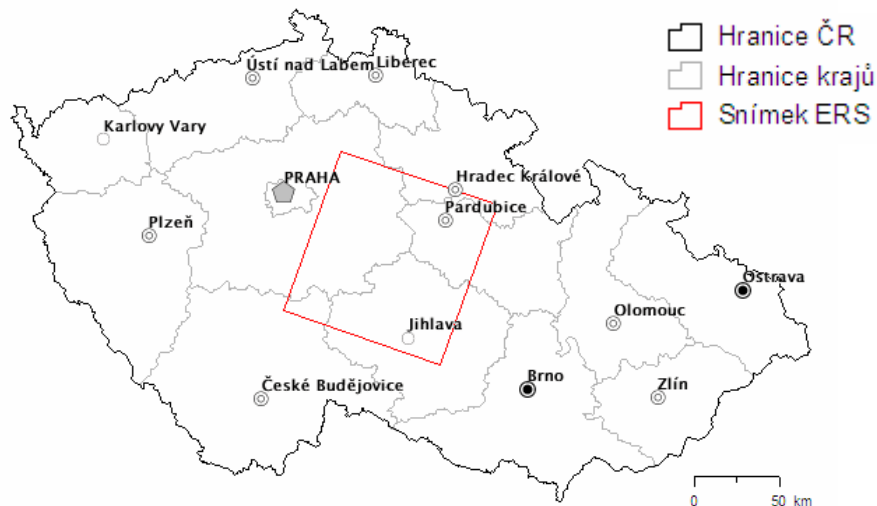
Velikost scény	2500 pixelů (<i>range</i>) x 15000 řad (azimut)
Radiometrické rozlišení	8I, 8Q complex
Celková velikost produktu	~ 150 Mb
Projekce (projection)	Šikmá délka (<i>slant range</i>)
Počet pohledů	1

Pro vytváření interferogramů a DMT byly použity tři interferometrické dvojice z tandemu družic ERS z let 1997 a 1999 (tab. 5.2, obr. 5.1), které byly získány v rámci výzkumného projektu ESA č. 7443 (Resampling in SAR Image Coregistration). Snímky jsou ve formátu CEOS (*Committee for Earth Observation Standards*). Jde o standardní formát pro ukládání rastrových dat v digitální podobě (ref. ER-IS-EPO-GS-5902).

Tab. 5.2 Přehled snímků SAR SLC (zdroj: dokumentace k produktu, ESA)

ERS-1	ERS-2
Date - Orbit - Track - Frame - Pass:	Date - Orbit - Track - Frame - Pass:
11.10.1997 – 32632– 079 – 2601 – Desc.	12.10.1997 – 12959– 079– 2601 – Desc.
07.08.1999 – 42151– 079– 2601 – Desc.	08.08.1999 – 22478– 079– 2601 – Desc.
16.10.1999 – 43153 – 079– 2601 – Desc.	17.10.1999 – 23480 – 079– 2601 – Desc.

Družice ERS se pohybují na heliosynchronní dráze s inklinací 98° 52' a výškou mezi 782 až 785 kilometry. Termínové rozlišení je 35 dnů. Během "tandemové fáze" ERS-2 následoval s jednodenním zpožděním za ERS-1. SAR ERS (v Image Mode) pořizuje 100 km široké scény vpravo od směru letu družice. Anténa o velikosti 10x1 m pracuje na frekvenci 5,3 GHz (pásmo C – vlnová délka 5,6 cm). Úhel dopadu uprostřed scény je 23° (krajní hodnoty 20,1° a 25,9°), polarizace VV (Kolář, 2008).



Obr. 5.1 Geografické umístění zpracovávaných snímků z ERS
(podkladová data: <http://geoportal.cenia.cz>)

CORINE00

Pro analýzu Land Cover byla použita data CORINE z roku 2000, která pro účely této práce laskavě zapůjčila Česká informační agentura životního prostředí (CENIA). Pro účely této práce byly vybrány třídy zástavba, lesní porosty a orná půda.

Program CORINE (*COoRdination of INformation on the Environment*) byl zahájen v roce 1985. Iniciátorem byla Evropská komise a cílem je sběr, koordinace a zajištění kvalitních informací o životním prostředí a přírodních zdrojích, které jsou srovnatelné v rámci Evropského společenství. Program má několik částí: *Land Cover* (krajinný pokryv), *Biotopes* (biotopy) a *Air* (ovzduší). Cílem projektu CORINE Land Cover je tvorba databáze krajinného pokryvu Evropy na základě jednotné metodiky a pravidelná aktualizace databáze. Databázi tvoří polygony vzniklé interpretací družicových snímků nasnímaných v příslušném referenčním roce. Výstupem jsou mapy vegetačního pokryvu v měřítku 1 : 100 000. Mapy vyjadřují rozložení krajinného pokryvu v daném roce. Dále jsou tvořeny změnové databáze, které vyjadřují přírůstky a úbytky ploch jednotlivých tříd mezi dvěma referenčními lety. Zatím byly vytvořeny databáze pro rok 1990, 2000 a 2006 a změnové databáze, které vyjadřuje přírůstky a úbytky ploch jednotlivých tříd mezi roky 1990 a 2000 a mezi lety 2000 a 2006 (CENIA, 2010).

V České republice spravuje databázi dat o krajinném pokryvu agentura CENIA. K prohlížení jsou data dostupná přes GIS Server geoportal.cenia.cz.

Digitální model reliéfu 4. Generace (DMR 4G)

Jako referenční model pro porovnání vytvořených SAR DMT jsem použila DMR 4G, což je prozatím používaný název pro produkt ZÚ Pardubice z leteckého laserového skenování (LLS) ČR. Pro mou práci mi byly laskavě zapůjčeny ascii soubory v souřadnicovém systému WGS84/UTM pásmo 33, výškovém systému Bpv, s rozlišením 5 m × 5 m. Celková velikost oblasti, specifikované jako KM10 500_5540, je 10 km². Další informace o produktu jsou uvedeny v tab. 5.3. Odhadovaná výšková přesnost (RMS) DMR 4G v otevřeném terénu je 0,30 m, v lesních oblastech pak 1,0 m.

Tab. 5.3 Vybrané parametry produktu DMR 4G

(zdroj: dokumentace k produktu, ZÚ Pardubice)

Doba skenování	25.3.2010 a 1.4.2010
Skener	LMS Q-680
Frekvence skeneru	120 kHz
Zorné pole (Field of View)	30°
Název náletového bloku	S_049
Délka bloku	30 km
Šířka bloku	10 km
Počet podélných náletových os	12
Počet příčných náletových os	2
Příčný překryt měřických pásů	cca. 50% (závisí na výšce terénu)
Vzdálenost náletových os	cca. 833 m
Letová rychlost	250 km/h
Střední výška letu nad terénem (H)	1400 m
Absolutní výška letu (H _a)	1629 m n. m.
Střední výška terénu	229 m n. m.

ZABAGED

ZABAGED je digitální geografický model území České republiky, který svou přesností a podrobností zobrazení geografické reality odpovídá přesnosti a podrobnosti Základní mapy České republiky v měřítku 1:10 000 (Šíma, Egrmajerová, 2004). Poskytuje údaje o výškách s přesností několika málo metrů ($\sigma_z = 0,716$ m).

Software

DORIS (*Delft object-oriented radar interferometric software*)

Pro interferometrické zpracování radarových dat jsem použila software DORIS v.4.02., který je vyvíjen na Technické Univerzitě v Delftu (The Delft Institute of Earth Observation and Space Systems of Delft University of Technology). Software si lze stáhnout ze stránek TU Delft (<http://enterprise.lr.tudelft.nl/doris/>). V tomto softwaru mohou být zpracovávána data především z družic ERS a ENVISAT, ale také z družic RADARSAT a JERS, která jsou ve formátu SLC (*Single Look Complex*). Pomocí DORIS mohou být vytvořeny interferogramy, digitální modely povrchu (kromě kroku rozbalení fáze) a mapy posunů. Pro rozbalení fáze musí být použit jiný program. DORIS pro tento krok volá program SNAPHU (*Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping*), který obsahuje algoritmus pro výpočet rozbalení fáze (Kampes ... [et al.], 2003).

MATLAB (*MATrix LABoratory*)

MATLAB je programové prostředí a skriptovací programovací jazyk pro vědeckotechnické numerické výpočty, modelování, návrhy algoritmů, analýzu a prezentaci dat a další aplikace (MathWorks). Tento software jsem využila pro analýzu a zhodnocení výsledku z programu DORIS a ArcGIS.

ArcGIS

Pro analýzu přesnosti digitálního modelu povrchu vytvořeného pomocí metody radarové interferometrie jsem použila program ArcGIS 9.2 firmy ESRI. Produkty ArcGIS jsou tvořeny aplikacemi ArcCatalog, ArcMap a ArcToolbox. Aplikace ArcCatalog slouží k organizaci a správě dat. ArcMap je centrální aplikace ArcGIS, která slouží pro všechny mapově orientované úlohy kartografie, prostorových analýz a editace dat. Aplikace ArcToolbox poskytuje organizovanou sadu nástrojů pro zpracování prostorových dat (Arcdata Praha).

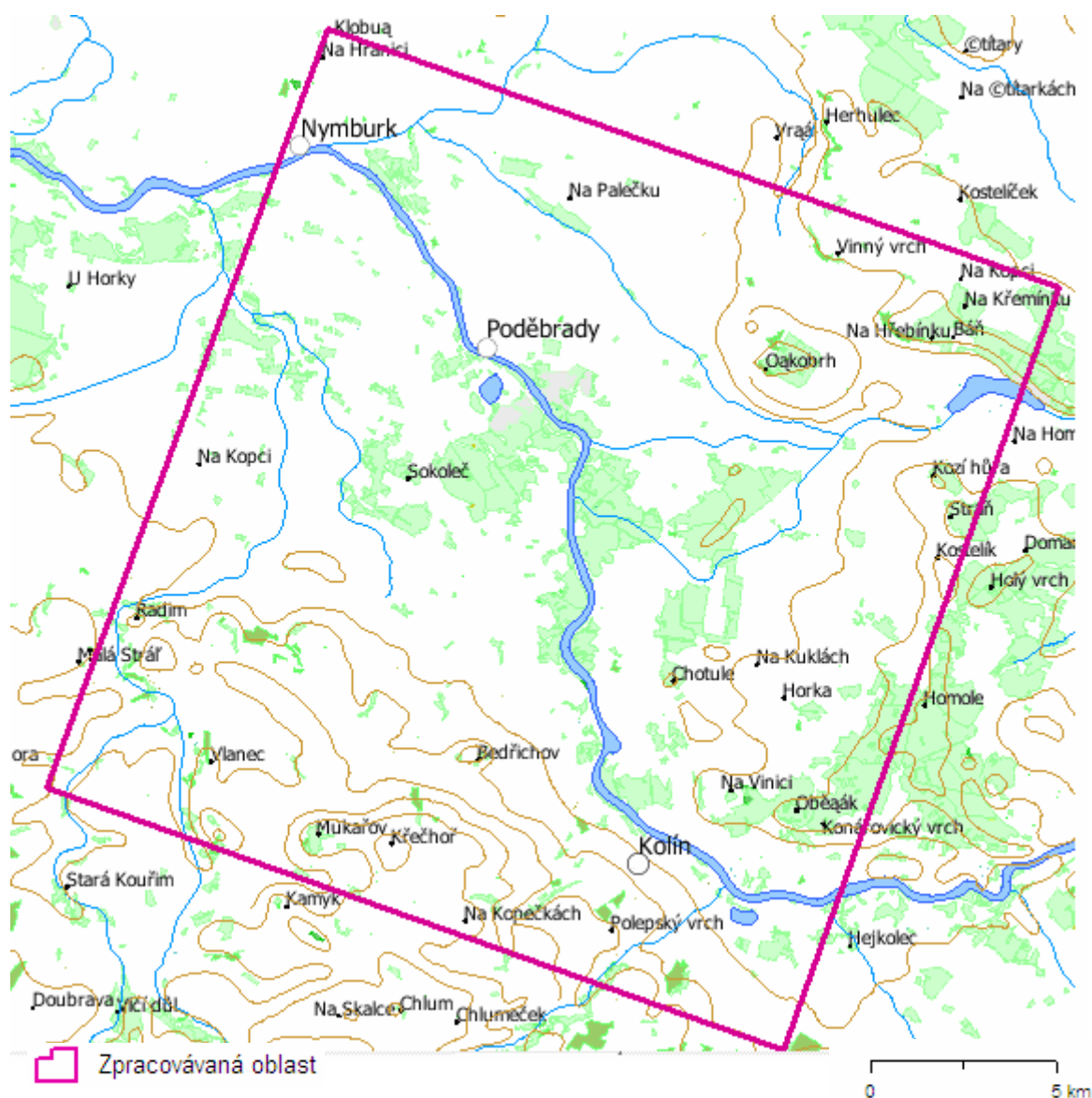
OrthoEngine

Modul OrthoEngine firmy PCI Geomatics umožňuje digitální zpracování a ortorektifikaci leteckých i družicových snímků. Software jsem využila pro výpočet polohového posunu mezi DMT SAR a referenčními DMT.

5.2 Zpracování dat

Zpracování 3 dvojic snímků ERS SAR SLC proběhlo v software DORIS v.4.02 (Kampes ... [et al.], 2003). Byla zpracována oblast přibližně 20 km × 20 km – Kolín, Poděbrady, Nymburk (obr. 5.2). Tato oblast byla vybrána z důvodu rovinatého povrchu, a to proto, aby se při hodnocení interpolačních algoritmů omezil vliv chyb způsobených topografií povrchu. Druhým důvodem byla existence velmi přesného referenčního DMT z leteckého laserového skenování pro část tohoto území (10 km × 10 km).

Kromě samotných snímků tvoří vstup pro interferometrické zpracování ještě parametry drah družic. Přesné parametry drah družic vypočtené DEOS (*Delft Institute for Earth-oriented Space Research*) mohou být získány pomocí skriptu *getorb*, který je součástí instalačního balíku DORIS.



Obr. 5.2 Zpracovávaná oblast (podkladová data: <http://geoportal.cenia.cz>)

Zpracování za účelem vytvoření DMT můžeme rozdělit do tří částí. První část tvoří koregistrace, při které je vedlejší radarový snímek polohově sjednocen s hlavním radarovým snímkem, a výpočet referenční fáze elipsoidu. Druhou část představuje výpočet komplexního interferogramu a mapy koherence. Poslední částí zpracování je vytvoření digitálního modelu povrchu. V dalším popisu jsou uvedeny kroky programu DORIS, které byly použity pro interferometrické zpracování. Mimo uvedených obsahuje program DORIS také další funkce, které nebyly v této práci použity. Bližší informace o nich lze zjistit v uživatelském manuálu k programu (Kampes, 2008).

Načtení cest k datům a parametrů snímků, které jsou důležité pro další zpracování, je v programu DORIS provedeno krokem `M_READFILES`, `S_READFILES` (pro hlavní - M a vedlejší - S snímek). Krok `M_PORBITS`, `S_PORBITS` volá skript *getorb* pro načtení přesných parametrů drah. V kroku `M_CROP`, `S_CROP` jsou SLC data načtena na disk buď celá, nebo ve zvoleném rozsahu. V případě této práce 20 km × 20 km. Byla zvolena možnost zadat kartografické souřadnice centrálního pixelu vybrané oblasti a počet pixelů ve směru azimutu a *range*.

5.3 Koregistrace a převzorkování

Nejprve je provedena tzv. hrubá koregistrace, při níž jsou snímky polohově sjednoceny s přesností několika pixelů. Hrubou koregistraci v DORIS představují dva kroky.

`COARSEORB` je koregistrace založená na parametrech drah (blíže Kampes, 2008), posun vedlejšího snímku je vypočten s přesností okolo 30ti pixelů.

Následuje krok `COARSECORR`, ve kterém je spočítán posun (ve směru azimutu a *range*) mezi hlavním a vedlejším radarovým snímkem s přesností několika pixelů. Pro zvolený počet pozic N ($N = 21$) a zvolenou velikost okna (doporučeno 64×64 pixelů) je počítána korelace mezi magnitudami snímků v prostorové - *magspace* nebo, v tomto případě použité, frekvenční doméně - *magfft* (rychlejší). Pro danou pozici N je určen posun s nejvyšší vypočtenou korelací. Celkový posun je pak určen jako modus.

Filtrování spektra v azimutálním směru (`M_FILTAZI`, `S_FILTAZI`) není nezbytným krokem, pokud se však velmi liší frekvence Doppler centroidu snímků, je vhodné tento krok provést. Ve směru azimutu dojde k odstranění části spektra, které se nepřekrývá se spektrem druhého snímku. Tento krok je vhodné provést po hrubé koregistraci a před jemnou koregistrací.

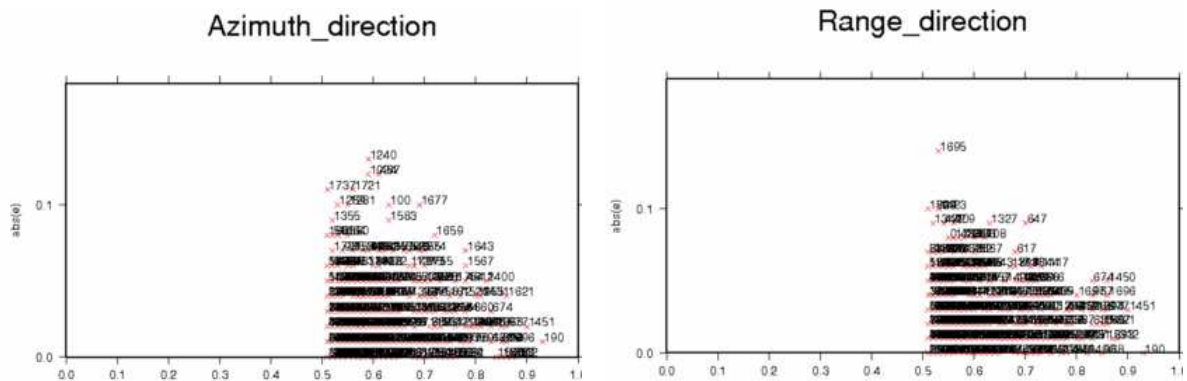
Jemná koregistrace je v programu DORIS představována krokem `FINE`. Při jemné koregistraci jsou snímky polohově sjednoceny se subpixelovou přesností. Pro velké množství oken ($1600, 64 \times 64$) se stejně jako u hrubé koregistrace vypočítá maximální korelace mezi magnitudami snímků (Kampes, 2008).

Blízké okolí těchto maxim je následně nadzorkováno (interpolováno), aby byla nalezena maxima na subpixelové úrovni. Výpočet může být opět proveden buď v prostorové, nebo ve frekvenční doméně. Metoda *magfft* je rychlejší, ale mění se při ní velikost vyhledávacího okna pro korelaci (v závislosti na posunu), metoda *magspace*, která byla pro zpracování použita, je pomalejší, ale velikost vyhledávacího okna (*patch size*) zůstává stejná.

Pomocí skriptu *plot offsets* lze zobrazit vektory posunů mezi snímky nad určitou hodnotou korelace.

Počet a rozmístění vektorů posunů nad zadanou hodnotou korelace, ale také existence/neexistence odlehlých hodnot vektorů, pomáhají vybrat správnou prahovou hodnotu korelace pro výpočet parametrů transformačních rovnic (polynomů 2. řádu), které je provedeno krokem COREGPM.

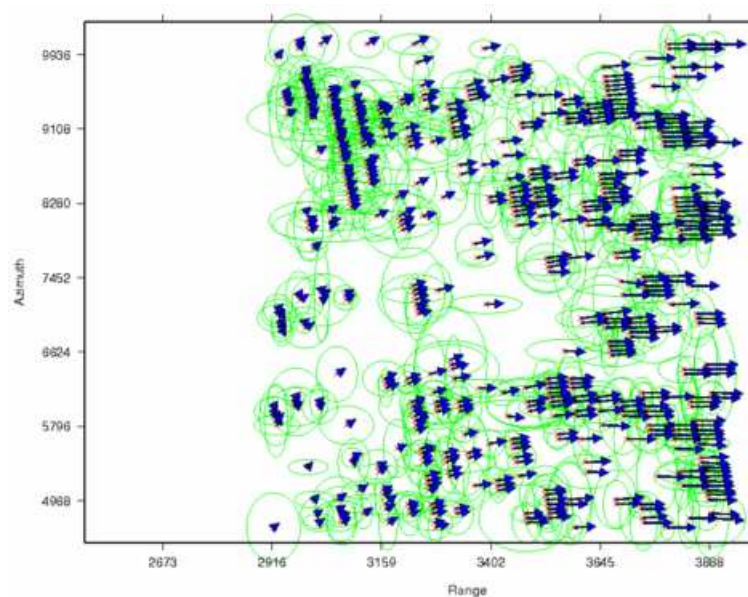
Tento polynom určuje transformaci vedlejšího snímku na mřížku hlavního snímku. Kromě nastavení prahové hodnoty korelace se nastavuje také stupeň polynomu (doporučeno 2.). Po ukončení výpočtu je doporučeno pomocí skriptu *plot cpm* zobrazit rezidua mezi modelem a původními posuny (obr. 5.3, obr. 5.4). Tento krok se často provádí několikrát, aby bylo dosaženo dobrého transformačního modelu.



Obr. 5.3 Zobrazení absolutní chyby (modelový posun – původní posun) ve směru azimutu a range pro interferometrickou dvojici z října 1999 (zdroj: výstup z programu DORIS) Většina absolutních chyb je menší než 0,1 pixelu.

V kroku RESAMPLE je na základě transformačního modelu a podle zvolené interpolační metody vedlejší snímek převzorkován. Jedná se o časově poměrně náročný krok. V práci byly testovány interpolační metody *Nearest Neighbor*, *Bilinear interpolation*, *6-point Cubic Convolution*, *6-point Truncated Sinc*, *6-point Knab interpolation kernel* a *6-point Raised Cosine kernel* (viz kapitola 3.3), poslední z nich je v literatuře uváděna jako nejlepší.

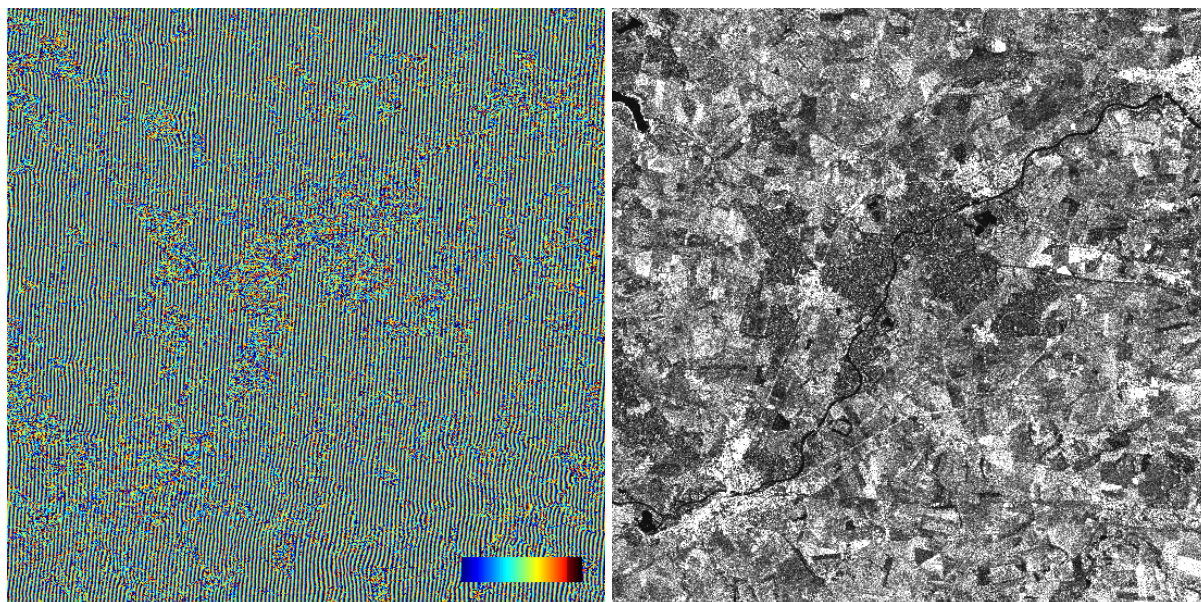
Interpolace je provedena jako *kernelová* funkce. Pro každý bod v oblasti překrytu obou snímků je vyhodnocen transformační model a podle zvolené interpolační metody určena hodnota nového pixelu. Pokud se do paměti počítače nevejde celý snímek, je zpracování provedeno v blocích.



Obr. 5.4 Zobrazení odhadovaných posunů u dvojice z října 1999 (zdroj: výstup z DORIS)

5.4 Vytvoření interferogramu a mapy koherence

Výpočet komplexního interferogramu (rovnice 3.2.) je implementován v kroku INTERFFERO. Pro snížení šumu může být v tomto kroku aplikován *multilook*. Pro dosažení přibližně čtvercových pixelů $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ se používá poměr 5 : 1 (azimut, *range*). Aplikací *multilook* se snižuje rozlišení, ale zvyšuje se SNR a snižuje se velikost souboru (Kampes, 2008). Na obr. 5.5 je fázový a amplitudový obraz interferogramu z října 1999.

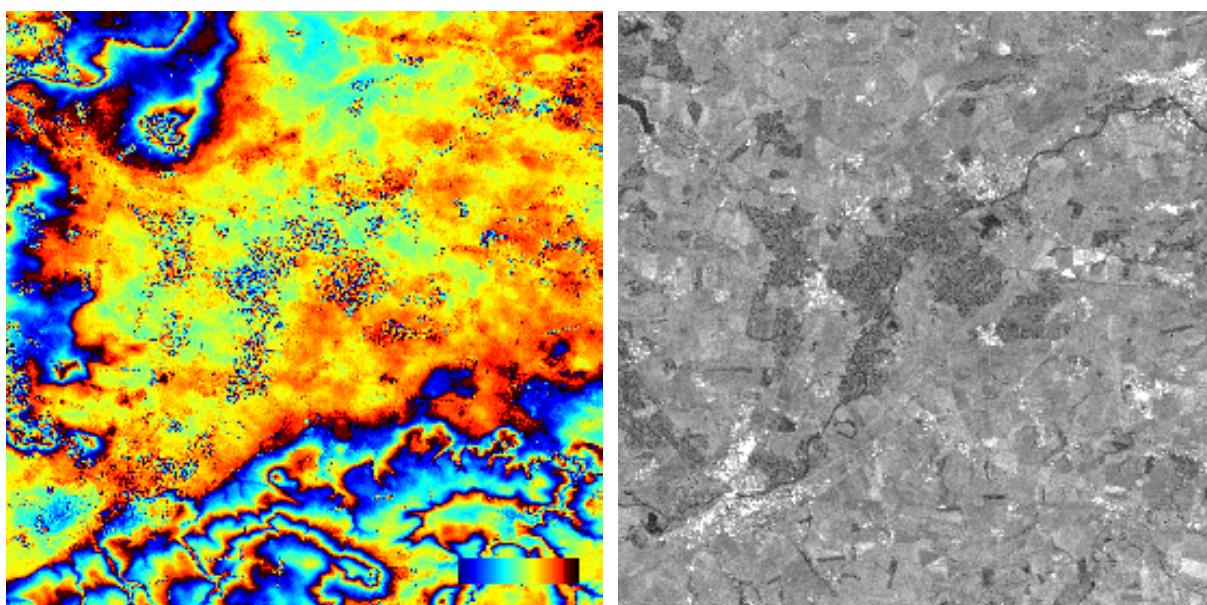


Obr. 5.5 Interferogram z interferometrické dvojice z října 1999 – fázová a amplitudová složka (zdroj: výstup z programu DORIS)

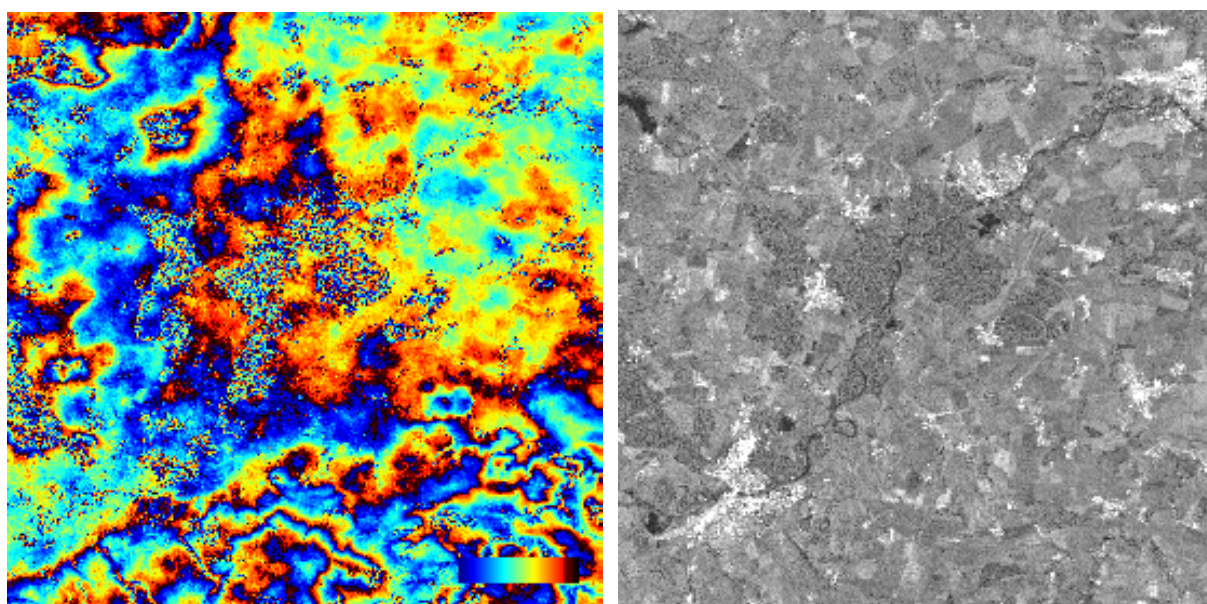
Výpočet a odečtení fáze odpovídající referenčnímu povrchu je provedeno v krocích COMREFPHA a SUBTRREFPHA. Metoda výpočtu fáze způsobené referenčním povrchem

je založena na přesných parametrech drah družic (Kampes, 2008). Referenční fáze je vypočtena pro zadané množství bodů ($N = 601$) načez je odvozen polynom 2. řádu. Pro modelování fáze referenčního povrchu celé scény obvykle stačí polynom 5. stupně.

Fáze referenčního povrchu je následně odečtena z komplexního interferogramu. V tomto kroku může být implementován další *multilook*. V této v tomto kroku byly voleny hodnoty pro *multilook* 2 : 2, výsledné rozlišení je tak přibližně 40 m × 40m. Po odstranění referenční fáze a snížení šumu (díky další aplikaci *multilook*) jsou proužky interferogramu jasnější a odpovídají topografii.



Obr. 5.6 Interferogram (říjen 1999) po odečtení fáze referenčního povrchu – fázová a amplitudová složka (zdroj: výstup z programu DORIS)

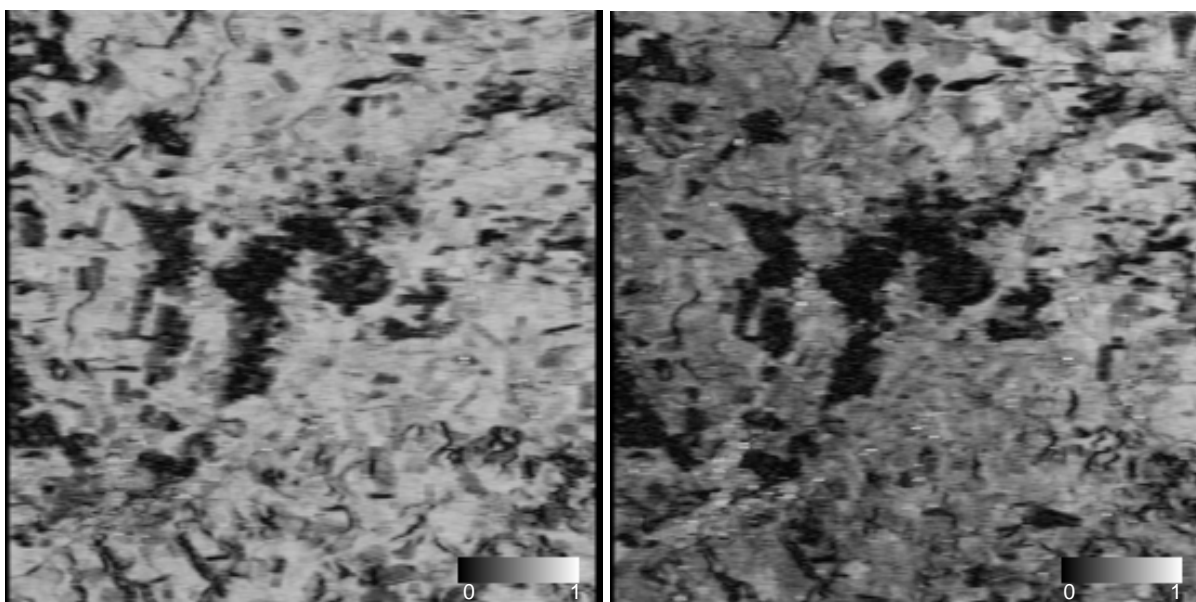


Obr. 5.7 Interferogram z interferometrické dvojice ze srpna 1999 po odečtení fáze referenčního povrchu – fázová a amplitudová složka (zdroj: výstup z programu DORIS)

Na obr. 5.6 a obr. 5.7 je fázový a amplitudový obraz interferogramu po odstranění referenční fáze z října a srpna 1999. U srpnových dat je viditelné větší množství šumu způsobené vegetací.

Koherenční mapa (obr. 5.8) je vypočtena v kroku COHERENCE. Pokud ve výsledcích existuje vypočtená fáze pro referenční povrch, je tato fáze odečtena. Koherenční mapa je vypočtena podle rovnic 4.2. a 4.3.

Pro snížení šumu je vhodné aplikovat *multilook* (L). Při nastavení parametrů velikosti okna (N) a L jsem vycházela z diplomové práce M. Girmaly (Grimala, 2006), která se touto problematikou zabývala. Jako nevhodnější doporučuje nastavení $N = 20$, $L = 20$. Pro takovou velikost L obsahuje koherenční obraz méně šumu a je kontrastnější. Prostorové průměrování pro velikost okna 20 je vhodné protože jde o oblast dostatečně malou na to, aby tato oblast mohla být považována za statisticky stabilní a odhad koherence za správný.

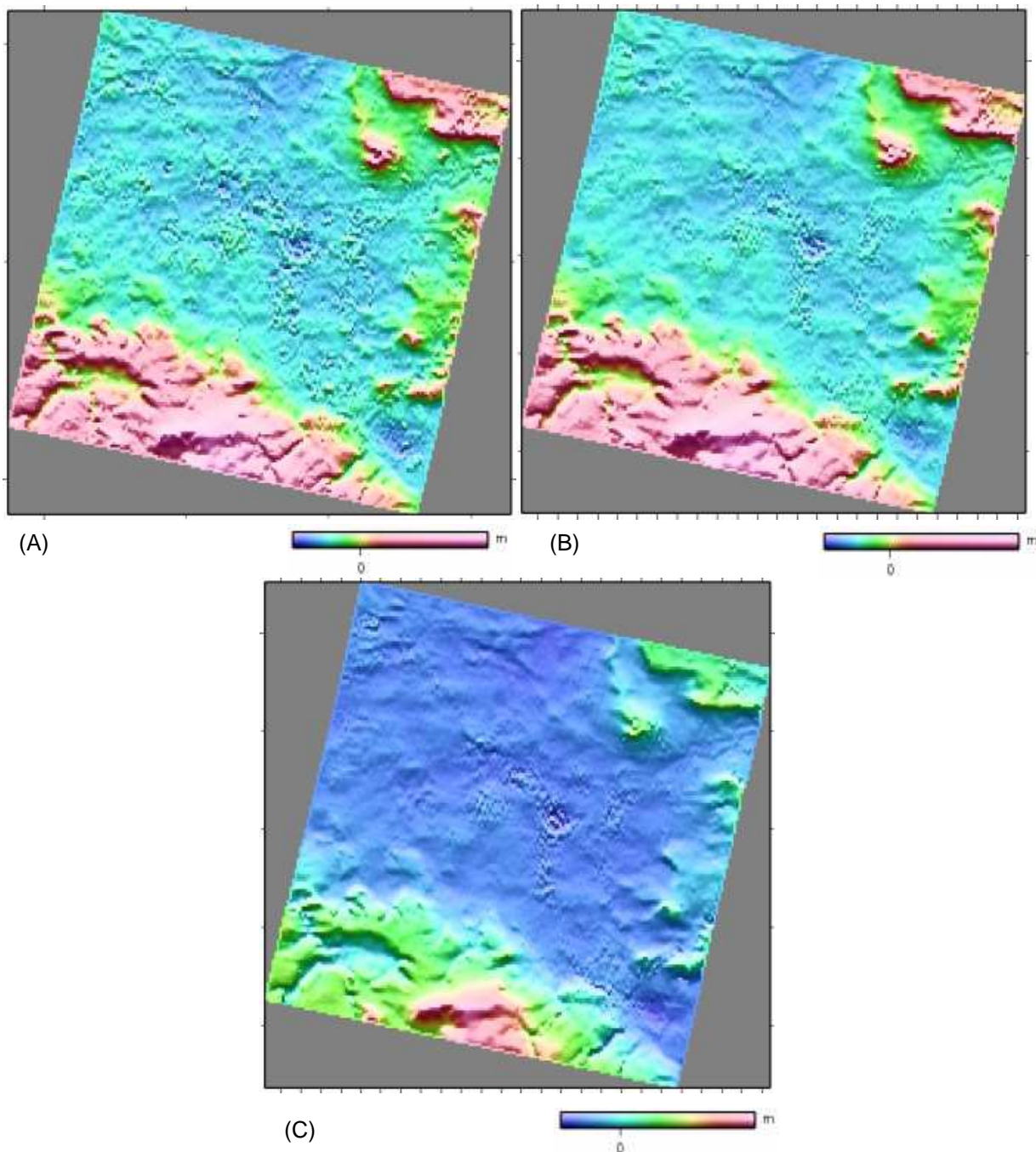


Obr. 5.8 Koherenční mapy pro interferometrické dvojice z října a srpna 1999 (zdroj: výstup z programu DORIS) Tmavší koherenční mapa pro srpnová data je dána vyšším podílem vegetace.

5.5 Rozbalení fáze a vytvoření DMT

Za účelem snížení šumu v interferogramu a pomoci pro rozbalování fáze je možné interferogram filtrovat. K tomuto účelu slouží krok FILTPHASE, ve kterém je implementováno několik metod. V této práci byla použita metoda *goldstein* (Goldstein, Werner, 1998) s parametrem $\alpha = 0,2$. Parametr α nabývá velikosti od 0 do 1 a udává míru shlazení. Srovnání DMT při použití $\alpha = 0,2$ a $\alpha = 0,5$ s DMT bez použití filtrování fáze je na obr. 5.9.

Metoda *goldstein* pracuje v blocích (doporučená velikost 32). Blok je Fourierovou transformací převeden do frekvenční domény (komplexní spektrum) a filtrován tak, že vrcholu magnitudové části spektra je přiřazena vyšší váha (1D kernel [1 2 3 2 1]). Tím dochází ke shlazení amplitudy spektra. Spektrum je dále umocněno parametrem α a použito jako váha pro komplexní spektrum. Je provedena zpětná transformace do prostorové domény (Kampes, 2008). Výsledkem je zvýraznění interferometrických proužků a vyhlazení DMT.



Obr. 5.9 Srovnání DMT SAR bez filtrování fáze (A) s DMT SAR filtrovanými metodou *goldstein* s parametrem $\alpha = 0,2$ (B) a $\alpha = 0,5$ (C) (zdroj: výstup z programu DORIS)

Obr. 5.8 byl vytvořen pomocí skriptu *ascii2ps*, který ze souboru *ascii* (viz dále) vytvoří obrázek *postscript*.

Krok UNWRAP – rozbalení fáze není v software DORIS implementován. Pokud je na počítači nainstalován program SNAPHU (volně stažitelný ze stránek http://www-star.stanford.edu/sar_group/snaphu/), DORIS jej v tomto kroku volá. SNAPHU rozbalí hodnoty fáze a předá je k dalšímu zpracování zpět programu DORIS. Krokem SLANT2H jsou hodnoty převedeny z výšky v šikmém pohledu na výšky odpovídající referenčnímu povrchu, ale zatím ještě v radarových souřadnicích. Jsou implementovány tři metody výpočtu. Kamps (2008) provedl porovnání těchto metod pro tandemová data ERS, pro oblast Veluwe v Holandsku. Nejlepší výsledky dosahovala metoda *schwabisch*. Proto byla tato metoda použita i v této práci. Krokem GEOCODE jsou pak výškám přiřazeny kartografické souřadnice. Problematika rozbalení fáze a výpočtu výšek nebyla řešena v rámci této práce.

Pomocí skriptu *lonlathei2ascii* lze pak 3 soubory (geografická délka, geografická šířka, topografická výška) převést na jeden soubor *ascii*. Pomocí skriptu *ascii2ascii_UTM* a programu *proj* lze výsledek převést do souřadnicového systému UTM, pásma 33, WGS84.

6 Analýza výsledků

6.1 Analýza vlivu interpolace na kvalitu interferogramu

Výběr interpolační metody má vliv na kvalitu výsledného interferogramu. Kvalita interferogramu byla hodnocena pomocí koherence mezi dvěma radarovými snímky a pomocí sumy fázových rozdílů (viz kapitola 4.1).

V programu DORIS byla vypočtena komplexní koherenční mapa (rovnice 4.2. a 4.3.). Pro snížení šumu byl při výpočtu použit *multilook* $L = 10 \times 2$. Velikost okna pro výpočet koherence byla zvolena $N = 20$. Při nastavení parametrů jsem vycházela z diplomové práce M. Girmaly (Grimala, 2006), která se zabývala metodami posouzení kvality interferogramu. Při velikosti *multilook* $L = 20$ obsahuje koherenční mapa méně šumu a je kontrastnější. Prostorové průměrování pro velikost okna $N = 20$ je vhodné protože jde o oblast dostatečně malou na to, aby tato oblast mohla být považována za statisticky stabilní a odhad koherence pak za správný. Hodnota koherence se pohybuje od 0 do 1, přičemž čím je koherence vyšší, tím vyšší je kvalita interferogramu.

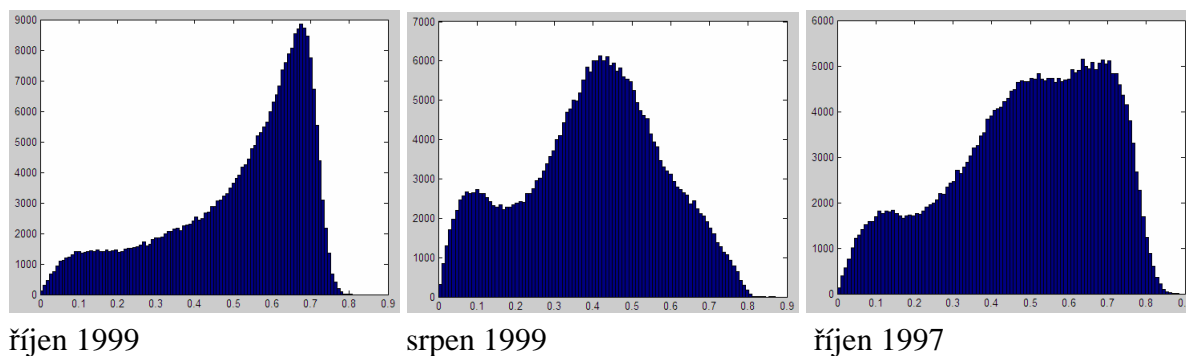
Pomocí skriptu *cpxfiddle* byla z komplexní koherenční mapy vybrána pouze reálná složka. Koherenční mapy odpovídající příslušným interpolačním metodám pak byly načteny a hodnoceny v programu MATLAB. Z histogramu hodnot koherence (obr. 6.1) je patrné, že se nejedná o normální rozdělení hodnot, proto byl jako ukazatel střední hodnoty zvolen medián (tab.6.1).

Tab. 6.1 Porovnání koherence pro jednotlivé interferometrické dvojice

(zdroj: vlastní výpočet)

Interpolační metoda	říjen 1999	srpen 1999	říjen 1997
<i>Nearest Neighbor</i>	0,537	0,385	0,481
<i>Bilinear interpolation</i>	0,561	0,405	0,496
<i>6-point Cubic Convolution</i>	0,568	0,410	0,514
<i>6-point Truncated Sinc</i>	0,565	0,407	0,511
<i>6-point Knab interpolation kernel</i>	0,568	0,410	0,513
<i>6-point Raised Cosine interpolation kernel</i>	0,566	0,408	0,512

Vyšších hodnot koherence dosahují složitější interpolační metody *Cubic Convolution*, *Knab interpolation kernel*, *Raised Cosine interpolation kernel* a *Truncated Sinc*. Metoda *Raised Cosine interpolation kernel*, která by teoreticky měla dosahovat nejvyšších hodnot (Cho ... [et al.], 2005) se od ostatních nijak výrazně neodchyluje. Metody *Nearest Neighbor* a *Bilinear interpolation* dosahují, podle předpokladu, nižší koherenci.



Obr. 6.1 *Histogramy hodnot koherence* (interpolační metoda *6-point Cubic Convolution*) (zdroj: výstup z programu MATLAB)

Nejvyšší kvalitu lze očekávat u interferogramu z října 1999. U dalších dvou interferogramů jsou v histogramu hodnot patrná ‘dílčí’ maxima v oblasti nízké koherence, která ukazují na vyšší podíl šumu. Interferometrická dvojice ze srpna 1999 dosahuje proti ostatním nižších hodnot koherence, což je způsobeno především vyšším podílem vegetace v daném období (další dvě dvojice představují říjnová data).

Dalším ukazatelem, podle kterého je možno hodnotit kvalitu interferogramu, je suma fázových rozdílů (Li ... [et al.], 2004). V kvalitním interferogramu by změna fáze mezi sousedními pixely měla probíhat plynule, fázový rozdíl sousedních pixelů by proto měl být malý, to znamená, že i suma všech fázových rozdílů by měla být malá. Čím nižší je potom suma fázových rozdílů, tím větší by měla být kvalita interferogramu. Tato metoda je vhodná pro porovnání kvality interferogramů se stejným počtem pixelů a rozlišením.

Pro výpočet sumy fázových rozdílů byl vytvořen vlastní skript v programu MATLAB. Pomocí skriptu *cpxfiddle* byly z komplexních interferogramů korigované o referenční fázi vybrány pouze hodnoty fáze, které byly poté načteny v programu MATLAB pomocí funkce *fread*. Pro okolí každého pixelu byly vypočteny fázové rozdílů a lokální suma těchto rozdílů (rovnice 4.4.). Poté byla vypočtena celková suma fázových rozdílů (tab. 6.2).

Tab. 6.2 *Porovnání sumy fázových rozdílů pro jednotlivé interferometrické dvojice* (zdroj: vlastní výpočet)

Interpolační metoda	říjen 1999	srpen 1999	říjen 1997
<i>Nearest Neighbor</i>	1 283 857	1 691 938	1 420 729
<i>Bilinear interpolation</i>	1 241 890	1 634 014	1 384 775
<i>6-point Cubic Convolution</i>	1 228 484	1 607 123	1 346 204
<i>6-point Truncated Sinc</i>	1 235 340	1 618 122	1 352 643
<i>6-point Knab interpolation kernel</i>	1 228 685	1 608 526	1 348 992
<i>6-point Raised Cosine interpolation kernel</i>	1 232 460	1 614 139	1 350 698

Ze srovnání vyplývá, že lepších, tedy nižších hodnot sumy fázových rozdílů dosahují opět složitější interpolační metody. Z nich především metody *Cubic Convolution* a *Knab interpolation kernel*. Metoda *Raised Cosine interpolation kernel* opět nijak výrazně nenaznačuje lepší kvalitu. Podle očekávání nejvyšších sum dosahují metody *Nearest Neighbor* a *Bilinear interpolation*. Ze srovnání mezi interferometrickými dvojicemi opět vykazují nejvyšší podíl šumu srpnové snímky.

6.2 Analýza vlivu interpolace na přesnost DMT

Hodnocení pomocí koherence je používáno ve většině prací, není však vždy nejvhodnější metodou. Li a Bethel (2008) uvádí, že hlavním standardem pro hodnocení přesnosti koregistrace i celého InSAR zpracování by měla být přesnost výsledného DMT. Přesnost DMT může být hodnocena pomocí směrodatné odchylky rozdílů výšky.

Proto jsou výsledky zhodnoceny také pomocí přesnosti výsledného DMT. Přesnost je hodnocena pomocí směrodatné odchylky výšky od referenčního digitálního modelu terénu vytvořeného ze ZABAGED a z dat leteckého laserového skenování (LLS). Kromě celkového hodnocení je analyzován vliv jednotlivých interpolačních metod pro vybrané typy Land Cover (půda bez vegetace, lesní porosty, zástavba).

Hodnocení bylo provedeno pouze u dvou interferometrických dvojic z roku 1999. U interferometrické dvojice z roku 1997 se bohužel nezdařilo úplné odstranění referenční fáze. Řešení odstranění zbývajících trendů z interferogramu přesahuje rámec této práce.

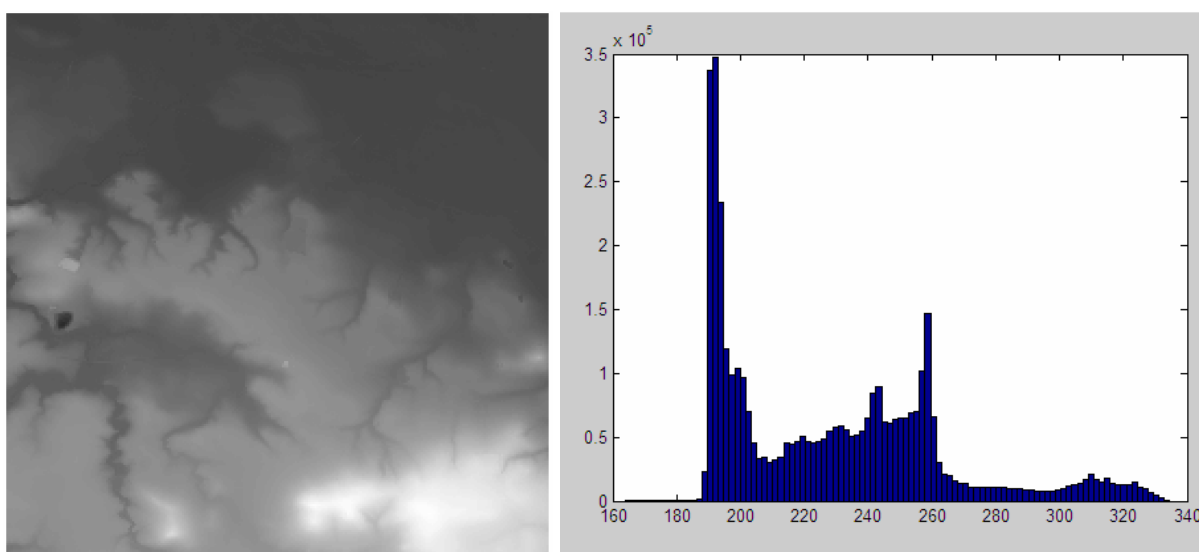
Pro každou ze zkoumaných interpolačních metod byl v programu DORIS vygenerován DMT ve formátu ascii xyz v kartografickém souřadnicovém systému UTM. Jedná se o relativní výškový model, hodnoty nejsou vztaženy k absolutní nadmořské výšce (obr. 6.3). Rozlišení je přibližně 40 m. Celková velikost zpracovávaného území je 20 km × 20 km.

Soubory ascii byly převedeny na databázové soubory (.dbf) a následně v programu ArcGIS na bodové vrstvy ve formátu *shapefile* (.shp). V programu ArcGIS byla také provedena interpolace z bodů na rastr s velikostí pixelu 40 m × 40 m pomocí interpolační metody *Nearest Neighbor*. Tato metoda byla zvolena také z důvodu, že zachovává původní hodnoty (nedochází ke změně hodnot přepočtením).

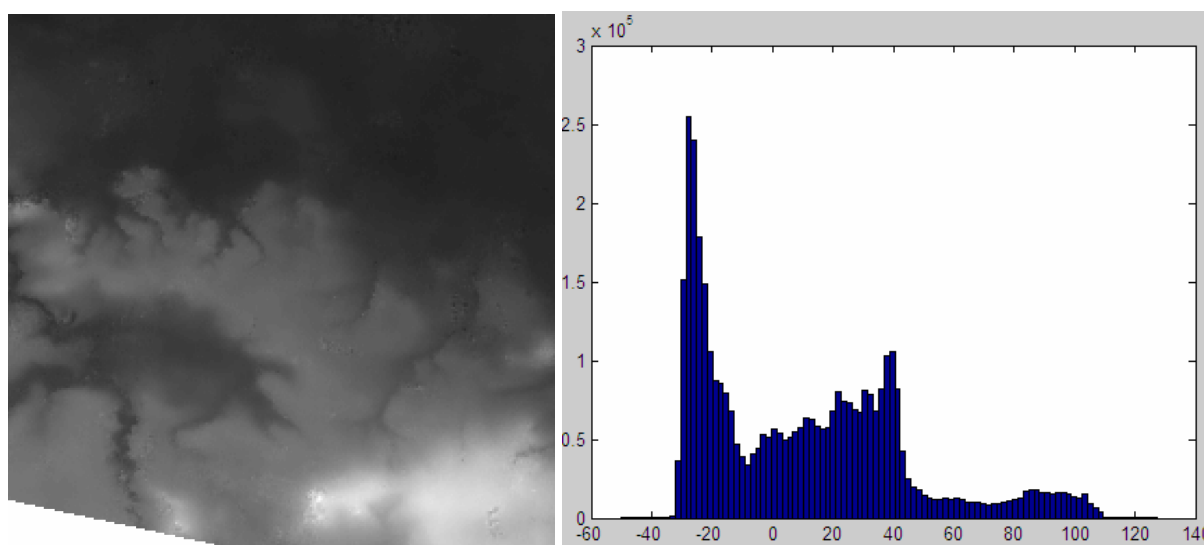
V programu ArcGIS byl připraven rastr pro referenční digitální model terénu z dat leteckého laserového skenování (LLS), který ve formátu ascii laskavě poskytnul ZÚ Pardubice. Celková velikost DMT LLS je 10 km × 10 km. DMT LLS je v kartografickém souřadnicovém systému UTM a výškovém systému Bpv.

Rozlišení dat LLS je $5\text{ m} \times 5\text{ m}$, výsledný rastr však měl mít stejné rozlišení jako rastry SAR ($40\text{ m} \times 40\text{ m}$). Dochází tedy ke změně rozlišení, interpolace z bodové vrstvy byla proto provedena pomocí funkce *Topo To Raster* (obr. 6.2).

Oba DMT se sice nacházejí ve stejném kartografickém zobrazení, přesto si polohově přesně neodpovídají, DMT SAR je vůči DMT LLS mírně posunut. V programu Geomatica, modulu OrthoEngine jsem se pokusila georeferencovat DMT LLS na DMT SAR pomocí 5ti vlíčovacích bodů (určení shodných bodů je velmi obtížné). Výsledky však nebyly nejlepší ($\text{RMS} > 40\text{ m}$), navíc by kvůli další transformaci mohlo docházet k zanášení dalších chyb. Proto byl vypočten pouze průměrný posun obou modelů, pro $x = 480\text{ m}$, pro $y = -80\text{ m}$, o který byl DMT LLS v programu ArcGIS (pomocí nástroje *Shift*) posunut.



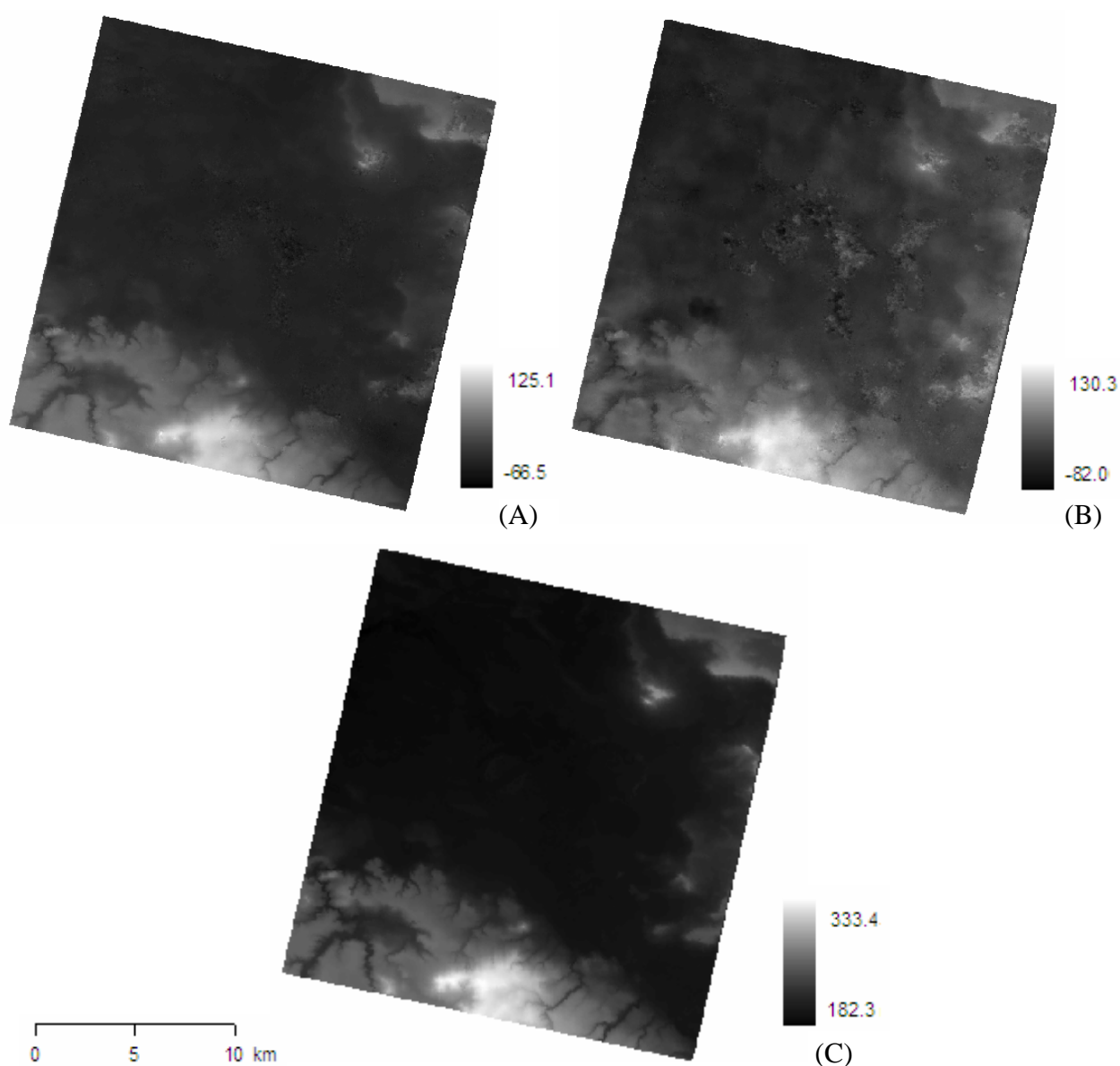
Obr. 6.2 DMT LLS a histogram hodnot jeho výšek (zobrazeno pomocí ArcGIS, MATLAB)



Obr. 6.3 DMT SAR z října 1999 a histogram hodnot jeho výšek (zobrazeno pomocí ArcGIS a MATLAB). Interpolace *Cubic Convolution*.

V programu ArcGIS byl připraven také referenční digitální model terénu z výškopisu ZABAGED pro stejné území jako u rastrů SAR, tedy zhruba 20 km × 20 km (obr. 6.4). Kartografický souřadnicový systém výškopisu ZABAGED je S-JTSK, proto bylo nutné nejprve provést transformaci vrstevnic (funkce *Project*) do souřadnicového systému UTM. Poté byl pomocí interpolace *Topo To Raster* z vrstevnic vytvořen rastr ve stejném rozlišení jako u rastrů SAR, tedy 40 m × 40 m. Stejně jako u DMT LLS bylo ještě nutné provést posun k DMT SAR. Byly použity stejné hodnoty jako u rastru DMT LLS.

Výšková přesnost referenčního digitálního modelu terénu musí být alespoň 3x vyšší než přesnost porovnávaného DMT (Höhle, 2009). DMT SAR obvykle dosahují výškové přesnosti v řádech metrů až desítek metrů. Oba referenční digitální modely terénu tuto podmínku splňují. Porovnání přesnosti ZABAGED vůči LLS je uvedeno v tab. 6.3.



Obr. 6.4 DMT SAR z října (A) a srpna (B) (interpolace *Cubic Convolution*) a DMT ZABAGED (C) (zobrazeno pomocí ArcGIS)

Tab. 6.3 Srovnání přesnosti DMT LSS a DMT ZABAGED (zdroj: vlastní výpočet)

	$\bar{x}_{\Delta h}$ [m]	$\sigma_{\Delta h}$ [m]
DMT ZABAGED – DMT LLS	0,55	1,67

Pomocí nadstavby *3D Analyst Tools/Raster Math/Minus* byl od rastrů SAR odečten rastr LLS (tab. 6.4) a stejným způsobem i rastr ZABAGED (tab. 6.5). Hodnoty výsledných rastrů představují rozdíl výšky. Hodnoty byly exportovány do formátu ascii a vyhodnoceny v programu MATLAB.

Tab. 6.4 Přesnost DMT hodnocená k DMT LLS (zdroj: vlastní výpočet)

DMT SAR – DMT LLS	říjen 1999		srpen 1999	
	$\bar{x}_{\Delta h}$ [m]	$\sigma_{\Delta h}$ [m]	$\bar{x}_{\Delta h}$ [m]	$\sigma_{\Delta h}$ [m]
Interpolační metoda				
<i>Nearest Neighbor</i>	-217,50	3,54	-222,70	9,27
<i>Bilinear interpolation</i>	-218,40	3,56	-221,99	9,63
<i>Cubic Convolution</i>	-218,58	3,57	-221,83	9,59
<i>Truncated Sinc</i>	-218,58	3,57	-221,81	9,63
<i>Knab interpolation kernel</i>	-218,55	3,57	-221,83	9,61
<i>Raised Cosine kernel</i>	-218,57	3,57	-221,82	9,62

Tab. 6.5 Přesnost DMT hodnocená k DMT ZABAGED (zdroj: vlastní výpočet)

DMT SAR – DMT ZABAGED	říjen 1999		srpen 1999	
	$\bar{x}_{\Delta h}$ [m]	$\sigma_{\Delta h}$ [m]	$\bar{x}_{\Delta h}$ [m]	$\sigma_{\Delta h}$ [m]
Interpolační metoda				
<i>Nearest Neighbor</i>	-220,77	5,46	-218,27	12,59
<i>Bilinear interpolation</i>	-220,96	5,15	-217,73	12,61
<i>Cubic Convolution</i>	-221,03	5,07	-217,41	12,72
<i>Truncated Sinc</i>	-221,04	5,07	-217,45	12,67
<i>Knab interpolation kernel</i>	-221,03	5,08	-217,36	12,72
<i>Raised Cosine kernel</i>	-221,03	5,08	-217,47	12,68

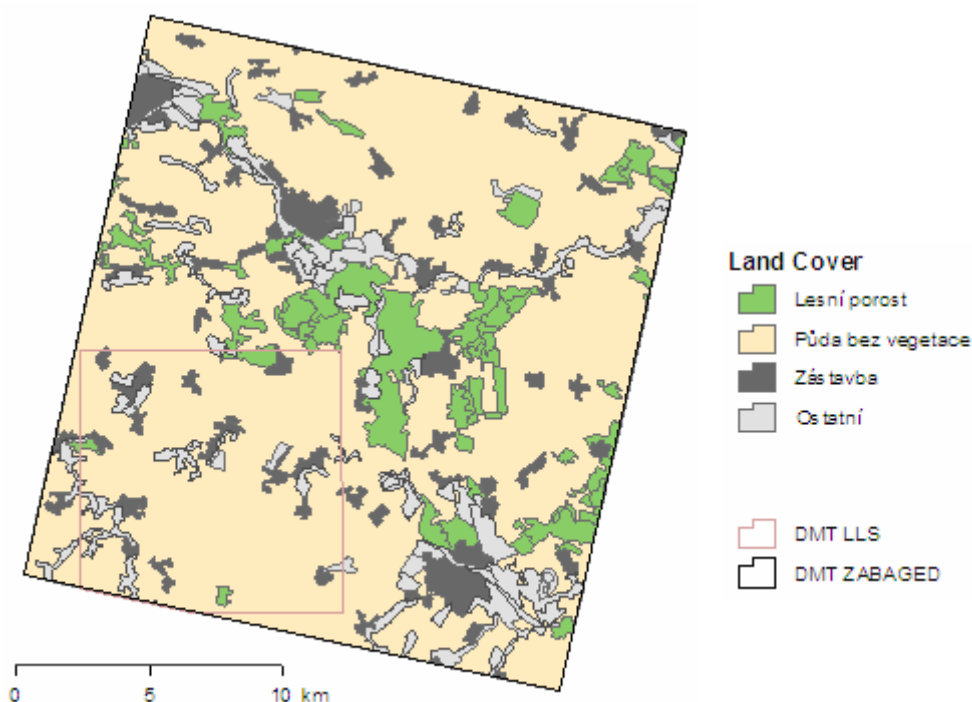
Ukazatel průměru udává průměrný rozdíl výšek mezi modely. Porovnání vlivu interpolačních metod na přesnost DMT můžeme hodnotit pomocí směrodatné odchylky rozdílů výšek (rovnice 4.6.). Výsledné rozdíly mezi metodami jsou však tak malé (v řádech centimetrů), že s ohledem na výškovou přesnost DMT (4-5 metrů) je nelze hodnotit a můžeme konstatovat, že na výslednou přesnost DMT nemá výběr interpolační metody vliv.

Posun výšky u rastrů SAR do absolutních hodnot výšky byl proveden pomocí zvoleného bodu, pro který byl v programu ArcGIS určen posun hodnot výšky k referenčním datům (tab. 6.6).

Tab. 6.6 Rozdíl výšky mezi DMT SAR a referenčními DMT v určeném bodě
(zdroj: vlastní výpočet)

DMT SAR – DMT ZABAGED	LLS		ZABAGED	
	říjen	srpen	říjen	srpen
<i>Nearest Neighbor</i>	217,20	226,84	219,22	228,86
<i>Bilinear interpolation</i>	218,25	224,39	220,27	226,41
<i>Cubic Convolution</i>	218,45	224,36	220,47	226,38
<i>Truncated Sinc</i>	218,47	224,47	220,49	226,49
<i>Knab interpolation kernel</i>	218,44	224,39	220,46	226,41
<i>Raised Cosine kernel</i>	218,46	224,43	220,48	226,45

Rastry DMT SAR byly korigovány o příslušnou výšku (*3D Analyst Tools/Raster Math/Plus*), poté od nich byly odečteny referenční digitální modely LLS a ZABAGED (*3D Analyst Tools/Raster Math/Minus*). Výsledné rastry rozdílů výšek byly hodnoceny jako celek i pro části tvořené zvolenými typy Land Cover (tab. 6.7). K tomuto hodnocení byl využit nástroj *Spatial Analyst Tools/Zonal/Zonal Statistics as Table*. Jako maska typu Land Cover vstupovala do tohoto zpracování polygonová vrstva dat CORINE00 s upravenými třídami – Půda bez vegetace, Lesní porosty a Zástavba (obr. 6.5).



Obr. 6.5 Vybrané typy Land Cover pro zpracovávané území (podkladová data: CORINE00)

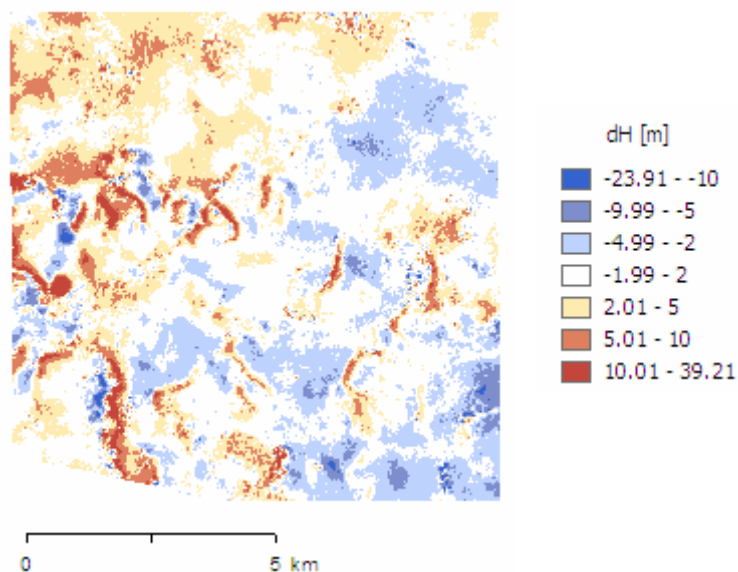
Tab. 6.7 Analýza přesnosti DMT pro různé typy Land Cover (zdroj: vlastní výpočet)

Interpolační metoda	DMT SAR – DMT LLS				DMT SAR – DMT ZABAGED			
	říjen		srpen		říjen		srpen	
	$\bar{x}_{\Delta h}$	$\sigma_{\Delta h}$	$\bar{x}_{\Delta h}$	$\sigma_{\Delta h}$	$\bar{x}_{\Delta h}$	$\sigma_{\Delta h}$	$\bar{x}_{\Delta h}$	$\sigma_{\Delta h}$
Celý snímek								
<i>Nearest Neighbor</i>	0,46	3,54	5,17	9,27	-1,10	5,46	11,31	12,59
<i>Bilinear interpolation</i>	0,53	3,56	6,41	9,63	-0,32	5,15	12,38	12,61
<i>Cubic Convolution</i>	0,57	3,57	6,48	9,58	-0,17	5,07	12,62	12,71
<i>Truncated Sinc</i>	0,49	3,57	6,46	9,63	-0,26	5,07	12,53	12,67
<i>Knab kernel</i>	1,26	3,57	6,5	9,61	0,49	5,08	12,69	12,72
<i>Raised Cosine kernel</i>	0,52	3,57	6,47	9,62	-0,23	5,08	12,53	12,68
Půda bez vegetace								
<i>Nearest Neighbor</i>	0,16	3,25	5,00	9,18	-1,18	4,74	10,09	11,26
<i>Bilinear interpolation</i>	0,21	3,28	6,31	9,55	-0,45	4,45	11,34	11,40
<i>Cubic Convolution</i>	0,24	3,27	6,36	9,55	-0,31	4,38	11,44	11,45
<i>Truncated Sinc</i>	0,16	3,27	6,32	9,55	-0,39	4,38	11,40	11,45
<i>Knab kernel</i>	0,93	3,27	6,37	9,54	0,36	4,39	11,45	11,44
<i>Raised Cosine kernel</i>	0,19	3,27	6,34	9,55	-0,37	4,39	11,41	11,45
Lesní porosty								
<i>Nearest Neighbor</i>	3,49	5,38	7,13	13,04	-2,70	8,28	17,72	18,06
<i>Bilinear interpolation</i>	3,25	4,64	8,26	14,01	-1,62	7,85	17,32	17,88
<i>Cubic Convolution</i>	3,75	5,35	9,48	11,71	-1,40	7,71	18,72	17,90
<i>Truncated Sinc</i>	3,65	5,33	10,23	13,34	-1,48	7,74	18,15	17,78
<i>Knab kernel</i>	4,44	5,33	10,37	13,17	-0,75	7,75	19,29	17,83
<i>Raised Cosine kernel</i>	3,70	5,38	10,40	13,27	-1,47	7,73	18,02	17,90
Zástavba								
<i>Nearest Neighbor</i>	2,13	3,43	5,92	9,36	1,16	5,21	12,10	12,13
<i>Bilinear interpolation</i>	2,35	3,42	6,96	9,73	1,96	4,87	13,39	12,24
<i>Cubic Convolution</i>	2,35	3,44	6,97	9,73	2,10	4,80	13,49	12,29
<i>Truncated Sinc</i>	2,26	3,42	6,93	9,74	2,01	4,81	13,45	12,30
<i>Knab kernel</i>	3,04	3,43	6,98	9,73	2,76	4,82	13,49	12,28
<i>Raised Cosine kernel</i>	2,29	3,42	6,94	9,74	2,03	4,81	13,46	12,30

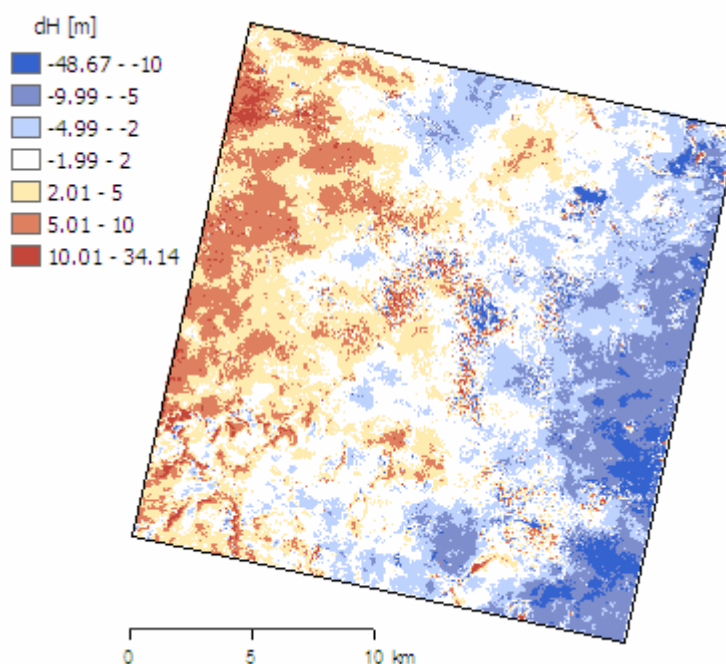
Z výsledků vyplývá, že posun výšky neovlivnil hodnotu směrodatné odchylky, hodnoty směrodatné odchylky pro celý snímek jsou stejné hodnoty jako u původních rastrů.

Nejvyšších hodnot směrodatné odchylky je dosaženo u typu Lesní porosty. Referenční DMT na rozdíl od DMT SAR neobsahují povrch vegetace a objektů na zemském povrchu. Přesto například u zástavby, není směrodatná odchylka rozdílu výšky tak vysoká jako u lesních porostů. U lesních porostů ovlivňuje výsledek především velké množství šumu z radarových dat. Obecně lepší jsou výsledky u říjnových dat, kdy je podíl vegetace nižší.

Půda bez vegetačního pokryvu, v porovnání s celým snímkem, dosahuje vyšší přesnosti. I zde jsou však rozdíly mezi jednotlivými interpolačními metodami nepatrné, výběr interpolace tak na přesnost výsledného DMT nemá vliv.



Obr. 6.7 Rastr rozdílů hodnot výšky mezi rastrem SAR (*Cubic Convolution*) a rastrem LLS (zobrazeno pomocí ArcGIS)



Obr. 6.8 Rastr rozdílů hodnot výšky mezi rastrem SAR (*Cubic Convolution*) a rastrem ZABAGED (zobrazeno pomocí ArcGIS)

Největší rozdíly mezi DMT jsou vázány na oblasti pokryté vzrostlou vegetací a vodní toky (obr. 6.7, obr. 6.8).

7 Diskuze metodických postupů a výsledků

Radarová interferometrie je metoda, jejíž pomocí lze vytvářet digitální modely povrchu s přesností v řádech metrů až desítek metrů. Přesnost této metody ovlivňuje řada faktorů. Především velikost prostorové a časové základny, topografie, vliv krajinného pokryvu a atmosféry (Hanssen, 2001). Tyto faktory jsou velmi důležité při výběru radarových snímků pro interferometrické zpracování. Také samotný proces zpracování má velký vliv na kvalitu výsledku. Pro vytvoření interferogramu je nutná koregistrace se subpixelovou přesností na jejímž konci je jeden z radarových snímků převzorkován na mřížku druhého.

Při převzorkování se používají různé interpolační metody. Nejběžnější z nich jsou *Nearest Neighbor*, *Bilinear interpolation*, *Cubic Convolution*, *Truncated Sinc*, *Knab interpolation kernel* a *Raised Cosine interpolation kernel*. Také interpolace je zdrojem chyb, které mají vliv na kvalitu výsledku. Tyto chyby vznikají především v důsledku oříznutí frekvenčního spektra při vzorkování a vzniku artefaktů v důsledku vzorkování (*aliasing*).

Hanssen a Bamler (1999) provedli obsáhlou teoretickou analýzu a hodnocení vlivu interpolačních metod *Nearest Neighbor*, *Bilinear interpolation*, *Cubic Convolution* a *Truncated Sinc* na kvalitu interferogramu na základě teoretických výpočtů a simulačních studií. Stejně byly hodnoceny metody *Knab interpolation kernel* v práci Migliaccio, Bruno (2003) a *Raised Cosine interpolation kernel* v práci Cho ... [et al.] (2005).

Li a Bethel (2008) provedli hodnocení metody *Truncated Sinc* v závislosti na délce použitého okna. Ze zhodnocení vyplývá, že pro délky okna větší než 8, začíná velikost koherence kolísat a nedosahuje výrazně lepších výsledků.

V této práci byla proto pro interpolační metody *Truncated Sinc*, *Knab interpolation kernel* a *Raised Cosine interpolation kernel* zvolena délka okna $L = 6$. Podle hodnocení v práci Li a Bethel (2008) nic nenasvědčuje tomu, že pro delší okna by výsledky byly lepší.

Práce Li a Bethel (2008) hodnotí vliv interpolačních metod *Nearest Neighbor*, *Bilinear interpolation*, *Cubic Convolution* a *Truncated Sinc* na kvalitu interferogramu pomocí koherence na reálných datech (USA, stát Indiana). Pro interferometrické zpracování používají tandemové snímky ERS. Z práce vyplývá, že interpolační metoda *Truncated Sinc* nedosahuje nijak lepších výsledků oproti časově méně náročným interpolačním metodám *Cubic Convolution* a dokonce i *Bilinear interpolation*.

Knab interpolation kernel a především metoda *Raised Cosine interpolation kernel* by měly podle teoretických výpočtů a simulačních studií (Migliaccio, Bruno, 2003), (Cho ... [et al.], 2005) dosahovat vyšší kvality výsledků než metody hodnocené v práci Li a Bethel (2008).

Tato diplomová práce se zabývá hodnocením vlivu výše zmíněných interpolačních metod na reálná data (tandem ERS). Hodnocení kvality interferogramu bylo provedeno pomocí koherence (např. Touzi ... [et al.], 1999), kterou používá většina prací, jako další možná metoda hodnocení byla zvolena suma fázových rozdílů (Li ... [et al.], 2004).

Jako ukazatel střední hodnoty koherence byl zvolen medián, protože rozdělení hodnot koherence neodpovídá normálnímu rozdělení. Koherence byla vyhodnocena v programu MATLAB. Vyšších hodnot koherence dosahují výpočetně náročnější interpolační metody *Cubic Convolution*, *Knab interpolation kernel*, *Raised Cosine interpolation kernel* a *Truncated Sinc*. Metoda *Raised Cosine interpolation kernel*, která by teoreticky měla dosahovat nejvyšších hodnot (Cho ... [et al.], 2005) se od ostatních nijak výrazně neodchyluje. Metody *Nearest Neighbor* a *Bilinear interpolation* dosahují, podle předpokladu, nižší koherenci.

Pro výpočet sumy fázových rozdílů byl vytvořen vlastní skript v programu MATLAB. Z porovnání interpolačních metod vyplývá, že lepších, tedy nižších hodnot sumy fázových rozdílů dosahují opět složitější interpolační metody. Z nich především metody *Cubic Convolution* a *Knab interpolation kernel*. Metoda *Raised Cosine interpolation kernel* opět nijak výrazně nenaznačuje lepší kvalitu. Podle očekávání nejvyšších sum dosahují metody *Nearest Neighbor* a *Bilinear interpolation*.

Nejvyšší kvalitu lze očekávat u interferogramu z října 1999. Hodnoty koherence i sumy fázových rozdílů vykazují nejlepší výsledky. Navíc je z rozdělení hodnot koherence patrný výrazný posun k vyšším hodnotám koherence. U dalších dvou interferogramů jsou v histogramu hodnot patrná 'dílčí' maxima v oblasti nízké koherence, která ukazují na vyšší podíl šumu. Interferometrická dvojice ze srpna 1999 dosahuje, proti ostatním, nejhorších výsledků, což je způsobeno především vyšším podílem vegetace v daném období (další dvě dvojice představují říjnová data).

Li a Bethel (2008) dále poukazují na to, že hodnocení pomocí koherence, která je používána ve většině prací, není nejvhodnější metodou pro hodnocení přesnosti koregistrace a interpolace. Jako hlavní standard pro hodnocení koregistrace i celého InSAR zpracování navrhuje přesnost výsledného DMT, kterou doporučují hodnotit s ohledem na Land Cover. Přesnost DMT lze hodnotit pomocí směrodatné odchylky rozdílů výšky.

Podle doporučení Li a Bethel (2008) bylo pro zhodnocení vlivu interpolačních metod použito hodnocení přesnosti výsledného digitálního modelu povrchu, s ohledem na typ Land Cover. Hodnocení bylo provedeno pouze u dvou interferometrických dvojic z roku 1999. U interferometrické dvojice z roku 1997 se bohužel nezdařilo úplné odstranění referenční fáze.

Přesnost DMT byla hodnocena pomocí směrodatné odchylky rozdílů výšky od referenčního digitálního modelu terénu vytvořeného ze ZABAGED a z dat leteckého

laserového skenování (LLS). Výšková přesnost referenčních digitálních modelů terénu musí být alespoň 3× vyšší než přesnost porovnávaného DMT (Höhle, 2009). DMT SAR obvykle dosahují výškové přesnosti v řádech metrů až desítek metrů. Oba referenční digitální modely terénu tuto podmínku splňují. Kromě celkového hodnocení je analyzován vliv jednotlivých interpolačních metod pro vybrané typy Land Cover (půda bez vegetace, lesní porosty, zástavba). Další typy Land Cover nebyly v zájmovém území výrazně zastoupeny.

Výsledné rozdíly mezi metodami jsou však tak malé (v řádech centimetrů), že s ohledem na výškovou přesnost DMT (4-5 m) je hodnotit nelze.

Posun výšky o zvolenou konstantní hodnotu neovlivní hodnotu směrodatné odchylky, DMT SAR tak mohou být převedeny do absolutních výšek (ke zvolenému referenčnímu DMT). Obecně lepší jsou výsledky u říjnových dat, kdy je podíl vegetace nižší.

Problémem s hodnocením s ohledem na typ Land Cover byla skutečnost, že referenční DMT neobsahovaly povrch vegetace a objektů na zemském povrchu na rozdíl od DMT SAR. Přesto si můžeme povšimnout, že u zástavby, není směrodatná odchylka rozdílu výšky tak vysoká jako u lesních porostů. U lesních porostů ovlivňuje výsledek především velké množství šumu z radarových dat, které je vázané na vzrostlou vegetaci.

Typ Land Cover – půda bez vegetačního pokryvu je pro porovnání výsledků velmi vhodný, protože k tomuto typu se váže nejmenší množství šumu. Z porovnání směrodatných odchylek rozdílů výšky je také patrné, že oproti výsledkům pro celou scénu, dosahuje vyšší přesnosti. I zde jsou však rozdíly mezi jednotlivými interpolačními metodami nepatrné.

Z dosažených výsledků můžeme konstatovat, že výběr interpolační metody na výslednou přesnost DMT (s rozlišením 40 m × 40 m) nemá vliv.

8 Závěr

Koregistrace dvou radarových snímků se subpixelovou přesností je nezbytná pro správné odečtení fáze a vytvoření kvalitního interferogramu. Tento krok je zakončen převzorkováním jednoho radarového snímku na mřížku snímku druhého. Při převzorkování se používají různé interpolační metody.

Z hlediska přesnosti výsledného DMT (s rozlišením $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$) nemá výběr interpolační metody při koregistraci snímků vliv.

Z analýzy vlivu interpolačních metod na kvalitu interferogramu pomocí koherence a sumy fázových rozdílů vyplývá, že interpolační metody *Cubic Convolution*, *Truncated Sinc*, *Knab interpolation kernel* a *Raised Cosine interpolation kernel* dosahují lepších výsledků než metody *Nearest Neighbor* a *Bilinear interpolation*. Nic však nenaznačuje, že by výpočetně náročnější metody *Truncated Sinc*, *Knab interpolation kernel* a *Raised Cosine interpolation kernel* dosahovaly lepších výsledků než interpolační metoda *Cubic Convolution*, jejíž použití je časově méně náročné.

Pro účel vytvoření digitálního modelu povrchu z dat družic ERS tak postačuje použít tuto metodu. Pro snímky z října 1999 dosahuje přesnost vytvořeného DMT 4-5 m.

Při interferometrickém zpracování za účelem vytvoření digitálního modelu povrchu se nepotvrdilo, že při použití výpočetně náročnějších interpolačních metod bude dosaženo lepších výsledků (Hanssen, Bamler, 1999), (Migliaccio, Bruno, 2003) a (Cho ... [et al.], 2005). Jiná situace by mohla nastat u diferenční interferometrie, při níž se zjišťují změny mezi DMT s přesností v řádech několika málo centimetrů. To může být námětem pro další práci.

Potvrdilo se, že přesnost metody InSAR je závislá také na typu Land Cover. Pro půdu bez vegetace dosahuje nejlepších výsledků. Pro hodnocení výsledků InSAR z hlediska Land Cover by bylo vhodné získat referenční digitální model *povrchu* s přesností 3× lepší než DMT SAR, tedy alespoň 1 m.

Při interferometrickém zpracování za účelem vytvoření digitálního modelu povrchu se jako optimální interpolační metoda jeví metoda *6-point Cubic Convolution*.

9 Použité zdroje a literatura

Literatura

- CCRS (2007): Microwave Remote Sensing. In *Fundamentals of Remote Sensing*. Canada Centre for Remote Sensing, 2007. [cit. 2009-5-8]. Dostupné z URL <http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf>.
- FERRETTI, A., MONTI-GUARNIERI, A., PRATI, C., ROCCA, F. (2007): *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. ESA Publications, 2007. ISSN 1013-7076.
- GOLDSTEIN, R. M., WERNER, C. L. (1998): Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*. 1998, roč. 25, č. 21, s. 4035-4038.
- GRIMALA, M. (2006): *Metódy posúdenia kvality interferogramu*. Praha, 2006, 90 s. Diplomová práca. ČVUT v Praze. Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Lena Halounová, Csc.
- HANSEN, R., BAMLER, R. (1999): Evaluation of interpolation kernels for SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1999, roč. 37, č. 1, část 1, s. 318-321. ISSN 0196-2892.
- HANSEN, R. (2001): *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001. 308 s.
- HÖHLE, J., HÖHLE, M. (2009): Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2009, roč. 64, s. 398-406.
- HRÁDEK, J. (2002): *Aliasing & Antialiasing*. [on-line]. [cit. 2010-08-03]. Dostupné z URL <http://herakles.zcu.cz/education/apg_2002_2003/hradek/html/aliasing.html>.
- CHO, B. L.; KONG, Y. K.; KIM, Y. S. (2005): Interpolation using optimum nyquist filter for SAR interferometry. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2005, roč. 19, č. 1, s. 129-135.
- JENSEN, J. R. (2000): *Aktive Microwave (RADAR)*. [prezentace]. Department of Geography University of South Carolina.
- KAMPES, B. (2008): *Delft Object-oriented Radar Interferometric Software: User's manual and technical documentation*. Delft Institute for Earth-oriented Space Research (DEOS), Delft University of Technology, 2008, 159 s. Manuál k programu DORIS. Dostupné z URL <<http://enterprise.lr.tudelft.nl/doris/>>.

- KAMPES, B., HANSEN, R., PERSKI, Z. (2003): Radar Interferometry with Public Domain Tools. In: *Proceedings of FRINGE 2003*. Frascati, Italy, 2003, 6 s.
- KOLÁŘ, J., HALOUNOVÁ, L., PAVELKA, K. (1997): *Dálkový průzkum Země 10*. Vydavatelství ČVUT, 1997, 164 s. ISBN 80-01-01567-X.
- KOLÁŘ, J. (2003): *Geografické informační systémy 10*. Vydavatelství ČVUT, 2003, 161 s.
- KOLÁŘ, J. (2008): *Radarová obrazová data a jejich využití*. [studie]. Praha, 2008, 55 s.
- LI, Z., BETHEL, J. (2008): Image Coregistration in SAR Interferometry. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*. ISPRS Congress Beijing. 2008, roč. XXXVII, část B1/I, s. 433-438. ISSN 1682-1750.
- LI, Z., ZOU, W., DING, X., CHEN, Y., LIU, G. (2004): A quantitative measure for the quality of InSAR interferograms based on phase differences. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2004, roč. 70, č. 10, s. 1131-1137.
- MIGLIACCIO, M., BRUNO, F. (2003): A new interpolation kernel for SAR interferometric registration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2003, roč. 41, č. 5, část II, s. 1105-1110.
- PCI Geomatics (2000). *GCPWorks Image Registration*. Uživatelský manuál k programu. [cit. 2010-07-30]. 2000, s. 5-20. Dostupné z URL <<http://www.pcigeomatics.com/cgi-bin/pcihlp/GCPWORKS/Theory/Resampling>>.
- QUEGAN, S. (1990): Interpolation and sampling in SAR Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1990, roč. 28, č. 4, s. 641-646.
- RICHARDS, M. A. (2007): A beginner's guide to interferometric SAR concepts and signal processing. *IEEE A&E Systems Magazine*. 2007, roč. 22, č. 9, 29 s.
- ŠÍMA, J., EGRMAJEROVÁ, L. (2004): Ověření přesnosti digitálního modelu reliéfu Základní báze geografických dat. *Geodetický a kartografický obzor*. 2004, roč. 50/92, č. 11, s. 213-230.
- TOUZI, R., LOPES, A., BRUNIQUEL, J., VACHON, P. W. (1999): Coherence Estimation for SAR Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1999, roč. 37, č. 1, s. 135-149.

Další zdroje

- ARCDATA PRAHA. Internetové stránky dodavatele softwaru ESRI. [cit. 2007-03-19]. Dostupné z URL <<http://www.arcdata.cz/>>.

- DPZ MUNI. Masarykova univerzita. *Dálkový průzkum Země v mikrovlnné části spektra*, 2004. [přednášky předmětu Dálkový průzkum Země]. [cit. 2009-4-28]. <http://www.geogr.muni.cz/archiv/vyuka/DPZ_CVICENI/Texty/DPZ_10_mikro_1.pdf>
- ESA. Evropská kosmická agentura. Data SAR SLC. Internetové stránky ESA [cit. 2010-05-09]. Dostupné z URL <<http://earth.esa.int/ers/>>.
- CENIA. Česká informační agentura životního prostředí. Data Corine 2000. Internetové stránky o projektu Corine 2000. [cit. 2010-08-15]. Dostupné z URL <<http://www.cenia.cz>>. Data z GIS Server. Dostupný z URL <<http://geoportal.cenia.cz>>.
- VÚGTK. Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí. Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický. [cit. 2010-08-21]. Dostupné z URL <<http://www.vugtk.cz/slovník/>>.
- ČÚZK. Český úřad zeměměřický a katastrální. Výškopis ZABAGED.
- MATHWORKS. Internetové stránky softwaru MATLAB. [cit. 2010-08-15]. Dostupné z URL <<http://www.mathworks.com/>>.
- ZÚ Pardubice. Zeměměřický úřad, zeměměřický odbor Pardubice. Digitální model reliéfu 4. Generace DMR 4G.

Seznam příloh

Příloha 1: Porovnání přesnosti DMT pro různé typy Land Cover k DMT LLS

Příloha 2: Porovnání přesnosti DMT pro různé typy Land Cover k DMT ZABAGED

Příloha 3: DVD s elektronickou verzí práce

Příloha 1: Porovnání přesnosti DMT pro různé typy Land Cover k DMT LLS (zdroj: vlastní výpočet)

SAR - LLS	říjen 1999					srpen 1999				
Celý snímek										
Interpolační metoda	MIN	MAX	Rozsah	$\bar{x}_{\Delta h}$	$\sigma_{\Delta h}$	MIN	MAX	Rozsah	$\bar{x}_{\Delta h}$	$\sigma_{\Delta h}$
<i>Nearest Neighbor</i>	-20,51	37,91	58,42	0,46	3,54	-48,46	59,25	107,71	5,17	9,27
<i>Bilinear interpolation</i>	-22,17	37,51	59,67	0,53	3,56	-44,86	65,84	110,70	6,41	9,63
<i>Cubic Convolution</i>	-23,91	39,21	63,12	0,57	3,57	-38,82	49,37	88,19	6,48	9,58
<i>Truncated Sinc</i>	-23,44	39,28	62,72	0,49	3,57	-36,65	65,62	102,27	6,46	9,63
<i>Knab kernel</i>	-22,39	39,72	62,11	1,26	3,57	-39,09	65,64	104,73	6,50	9,61
<i>Raised Cosine kernel</i>	-23,32	39,25	62,57	0,52	3,57	-36,37	65,63	102,00	6,47	9,62
Půda bez vegetace										
Interpolační metoda	MIN	MAX	Rozsah	$\bar{x}_{\Delta h}$	$\sigma_{\Delta h}$	MIN	MAX	Rozsah	$\bar{x}_{\Delta h}$	$\sigma_{\Delta h}$
<i>Nearest Neighbor</i>	-20,51	33,05	53,56	0,16	3,25	-48,46	41,61	90,07	5,00	9,18
<i>Bilinear interpolation</i>	-22,17	33,81	55,98	0,21	3,28	-44,86	42,47	87,33	6,31	9,55
<i>Cubic Convolution</i>	-23,91	33,42	57,34	0,24	3,27	-38,82	43,49	82,31	6,36	9,55
<i>Truncated Sinc</i>	-23,44	33,30	56,74	0,16	3,27	-36,65	40,92	77,57	6,32	9,55
<i>Knab kernel</i>	-22,39	34,11	56,51	0,93	3,27	-39,09	43,72	82,81	6,37	9,54
<i>Raised Cosine kernel</i>	-23,32	33,35	56,66	0,19	3,27	-36,37	40,98	77,35	6,34	9,55
Lesní porosty										
Interpolační metoda	MIN	MAX	Rozsah	$\bar{x}_{\Delta h}$	$\sigma_{\Delta h}$	MIN	MAX	Rozsah	$\bar{x}_{\Delta h}$	$\sigma_{\Delta h}$
<i>Nearest Neighbor</i>	-11,53	37,91	49,44	3,49	5,38	-34,62	59,25	93,87	7,13	13,04
<i>Bilinear interpolation</i>	-19,54	27,91	47,44	3,25	4,64	-34,30	65,84	100,15	8,26	14,01
<i>Cubic Convolution</i>	-10,26	39,21	49,46	3,75	5,35	-20,48	49,37	69,86	9,48	11,71
<i>Truncated Sinc</i>	-10,35	39,28	49,63	3,65	5,33	-20,99	65,62	86,62	10,23	13,34
<i>Knab kernel</i>	-9,48	39,72	49,20	4,44	5,33	-20,11	65,64	85,75	10,37	13,17
<i>Raised Cosine kernel</i>	-10,29	39,25	49,54	3,70	5,38	-20,87	65,63	86,50	10,40	13,27
Zástavba										
Interpolační metoda	MIN	MAX	Rozsah	$\bar{x}_{\Delta h}$	$\sigma_{\Delta h}$	MIN	MAX	Rozsah	$\bar{x}_{\Delta h}$	$\sigma_{\Delta h}$
<i>Nearest Neighbor</i>	-17,96	28,17	46,14	2,13	3,43	-34,28	29,68	63,96	5,92	9,36
<i>Bilinear interpolation</i>	-17,37	29,47	46,83	2,35	3,42	-30,67	38,47	69,13	6,96	9,73
<i>Cubic Convolution</i>	-16,44	29,17	45,61	2,35	3,44	-32,05	32,37	64,42	6,97	9,73
<i>Truncated Sinc</i>	-16,89	29,10	45,99	2,26	3,42	-31,46	33,11	64,57	6,93	9,74
<i>Knab kernel</i>	-15,98	29,83	45,81	3,04	3,43	-31,64	35,91	67,55	6,98	9,73
<i>Raised Cosine kernel</i>	-16,80	29,12	45,92	2,29	3,42	-31,62	32,94	64,56	6,94	9,74

Příloha 2: Porovnání přesnosti DMT pro různé typy Land Cover k DMT ZABAGED (zdroj: vlastní výpočet)

SAR - ZABAGED	říjen 1999					srpen 1999				
Celý snímek										
Interpolační metoda	MIN	MAX	Rozsah	$\bar{x}_{\Delta h}$	$\sigma_{\Delta h}$	MIN	MAX	Rozsah	$\bar{x}_{\Delta h}$	$\sigma_{\Delta h}$
<i>Nearest Neighbor</i>	-50,98	33,32	84,29	-1,10	5,46	-42,10	95,16	137,26	11,31	12,59
<i>Bilinear interpolation</i>	-48,98	33,99	82,97	-0,32	5,15	-42,11	102,94	145,05	12,38	12,61
<i>Cubic Convolution</i>	-48,67	34,14	82,81	-0,17	5,07	-44,04	89,75	133,79	12,62	12,71
<i>Truncated Sinc</i>	-48,81	33,89	82,70	-0,26	5,07	-41,69	117,58	159,27	12,53	12,67
<i>Knab kernel</i>	-47,90	34,63	82,53	0,49	5,08	-43,83	117,61	161,43	12,69	12,72
<i>Raised Cosine kernel</i>	-48,74	33,91	82,65	-0,23	5,08	-43,75	117,58	161,33	12,53	12,68
Půda bez vegetace										
Interpolační metoda	MIN	MAX	Rozsah	$\bar{x}_{\Delta h}$	$\sigma_{\Delta h}$	MIN	MAX	Rozsah	$\bar{x}_{\Delta h}$	$\sigma_{\Delta h}$
<i>Nearest Neighbor</i>	-30,59	26,53	57,12	-1,18	4,74	-41,31	68,47	109,78	10,09	11,26
<i>Bilinear interpolation</i>	-37,13	27,47	64,60	-0,45	4,45	-38,41	70,43	108,84	11,34	11,40
<i>Cubic Convolution</i>	-37,50	27,57	65,07	-0,31	4,38	-37,20	71,98	109,18	11,44	11,45
<i>Truncated Sinc</i>	-37,34	27,49	64,83	-0,39	4,38	-35,74	70,48	106,22	11,40	11,45
<i>Knab kernel</i>	-36,64	28,25	64,89	0,36	4,39	-37,47	70,52	107,99	11,45	11,44
<i>Raised Cosine kernel</i>	-37,34	27,52	64,85	-0,37	4,39	-34,88	70,49	105,37	11,41	11,45
Lesní porosty										
Interpolační metoda	MIN	MAX	Rozsah	$\bar{x}_{\Delta h}$	$\sigma_{\Delta h}$	MIN	MAX	Rozsah	$\bar{x}_{\Delta h}$	$\sigma_{\Delta h}$
<i>Nearest Neighbor</i>	-50,98	32,20	83,18	-2,70	8,28	-42,10	95,16	137,26	17,72	18,06
<i>Bilinear interpolation</i>	-48,98	32,98	81,96	-1,62	7,85	-42,11	102,94	145,05	17,32	17,88
<i>Cubic Convolution</i>	-48,67	32,38	81,05	-1,40	7,71	-44,04	89,75	133,79	18,72	17,90
<i>Truncated Sinc</i>	-48,81	32,48	81,29	-1,48	7,74	-41,69	117,58	159,27	18,15	17,78
<i>Knab kernel</i>	-47,90	33,24	81,15	-0,75	7,75	-43,83	117,61	161,43	19,29	17,83
<i>Raised Cosine kernel</i>	-48,74	32,50	81,25	-1,47	7,73	-43,75	117,58	161,33	18,02	17,90
Zástavba										
Interpolační metoda	MIN	MAX	Rozsah	$\bar{x}_{\Delta h}$	$\sigma_{\Delta h}$	MIN	MAX	Rozsah	$\bar{x}_{\Delta h}$	$\sigma_{\Delta h}$
<i>Nearest Neighbor</i>	-50,98	33,32	84,29	-1,10	5,46	-42,10	95,16	137,26	11,31	12,59
<i>Bilinear interpolation</i>	-48,98	33,99	82,97	-0,32	5,15	-42,11	102,94	145,05	12,38	12,61
<i>Cubic Convolution</i>	-48,67	34,14	82,81	-0,17	5,07	-44,04	89,75	133,79	12,62	12,71
<i>Truncated Sinc</i>	-48,81	33,89	82,70	-0,26	5,07	-41,69	117,58	159,27	12,53	12,67
<i>Knab kernel</i>	-47,90	34,63	82,53	0,49	5,08	-43,83	117,61	161,43	12,69	12,72
<i>Raised Cosine kernel</i>	-48,74	33,91	82,65	-0,23	5,08	-43,75	117,58	161,33	12,53	12,68