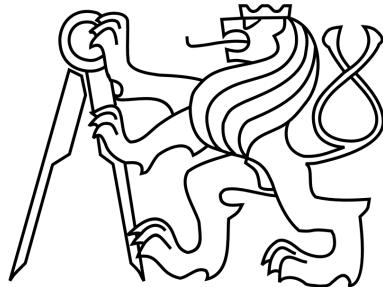


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA MAPOVÁNÍ A KARTOGRAFIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Porovnání DEM vypočtených z různých
tandem páru**

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Lena Halounová, CSc.

Červen 2007

Barbora Knechtlová

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady uvedené v seznamu literatury.

V Praze dne 5. června 2007

Barbora Knechtlová

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucí své diplomové práce Doc. Ing. Leně Halounové, CSc. a Ing. Ivaně Hlaváčové za pomoc a cenné připomínky a Ramonu Hanssenovi z Technické university v Delftu za uvedení do problematiky radarové interferometrie. Děkuji také své rodině za podporu při studiu.

V této práci byla použita data poskytnutá v rámci grantu Evropské kosmické agentury ESA. Pro jejich zpracování bylo užito volně dostupného programu DORIS a přesných orbit institutu DEOS.

Abstrakt

Tato diplomová práce pojednává o kvalitě digitálního modelu terénu (DEM) vy- tvořeného pomocí metody radarové interferometrie z tandem-párů družic ERS-1/2. Je zde zkoumána závislost přesnosti vytvořeného DEM na délce interferometrické základny, typu pokryvu a ročním období, ve kterém byla data pořízena. Součástí práce je také analýza koherence dat pro jednotlivé typy pokryvů. Výsledný DEM je porovnán s di- gitálním modelem terénu získaným v misi SRTM, Digitálním modelem území 1:25 000 (DMÚ25) a topografickou mapou.

Abstract

This Diploma Thesis handles the quality of digital elevation models (DEM) created by means of radar interferometry from ERS tandem pairs. The influence of perpendicular baseline length, land cover and acquisition time are analysed. In one part of this thesis coherence is dealt with respect to the land cover. Resulting DEM is compared with DEM acquired in SRTM mission, digital elevation model 1:25 000 (DMÚ25) and a topography map.

vložit originální zadání!!!!!!

Obsah

Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	xi
1 Úvod	1
2 Radarová interferometrie	3
2.1 Základní charakteristika radaru a technologie SAR	3
2.2 Historie SAR interferometrie	4
2.3 Aplikace radarové interferometrie	5
2.3.1 Topografické mapování	5
2.3.2 Monitorování deformací	6
2.3.3 Tematické mapování	7
2.3.4 Mapování atmosférického zpoždění	7
2.4 Princip interferometrie	8
2.4.1 Topografická výška	8
2.5 Formování obrazu	10
2.5.1 Rozlišovací schopnost radarového snímkování	10
2.5.2 Zobrazovací geometrie	13
2.6 Zpracování družicových snímků pomocí interferometrie	13
2.6.1 Výběr snímků	14
2.6.2 Předzpracování	16
2.6.3 Koregristrace	16
2.6.4 Převzorkování a interpolace	17
2.6.5 Filtrování	17
2.6.6 Tvorba interferogramu	18
2.6.7 Výpočet fáze pro referenční těleso	19

2.6.8	Výpočet koherence	19
2.6.9	Rozbalení fáze	20
2.6.10	Georeferencování	20
3	Kvalita DEM	21
3.1	Faktory ovlivňující kvalitu DEM	21
3.1.1	Geometrická dekorelace	22
3.1.2	Dekorelace způsobená odlišným Doppler centroidem	22
3.1.3	Dekorelace způsobená průnikem signálu do povrchové vrstvy	23
3.1.4	Tepelná dekorelace	23
3.1.5	Časová dekorelace	23
3.1.6	Dekorelace způsobená chybami koreRegistrace a interpolace	24
3.1.7	Vliv atmosféry, srážkové činnosti a sněhu	25
3.1.8	Typ povrchu a pokryvu	25
4	Družice a použitá data	26
4.1	Družice ERS	26
4.1.1	Technické parametry	26
4.1.2	Radarová data získaná z mise ERS	28
4.2	Mise SRTM	29
4.2.1	Data získaná v misi SRTM	30
4.3	Data CORINE	31
4.4	Digitální model území 1:25 000	32
4.5	Použité programy	32
4.5.1	DORIS	32
4.5.2	SNAPHU	32
4.5.3	MATLAB	33
5	Analýza přesnosti DEM	34
5.1	Postup zpracování ERS dat	34
5.1.1	Zpracování dalších datových souborů	36
5.1.2	Analýza koherence	36
5.1.3	Analýza závislosti přesnosti DEM na typu pokryvu	39
5.1.4	Tvorba výsledného DEM	39
5.1.5	Závislost kvality DEM na dni měření	42
5.1.6	Závislost kvality DEM na délce kolmé základny	42

5.1.7	Porovnání výsledného DEM a topografické mapy	43
5.1.8	Zhodnocení výsledků	45
6	Závěr	47
Literatura		50
A	Obrázky	I
B	Tabulky	XVII

Seznam obrázků

2.1	Geometrická konfigurace interferometrické metody	9
2.2	Geometrická situace při radarovém snímkování	11
2.3	Zobrazovací geometrie radarového snímání	14
2.4	Spektrální posun	19
4.1	Rozložení snímků ERS	28
4.2	Pokrytí zemského povrchu misí SRTM	30
4.3	Databáze CORINE2000	31
5.1	Histogram koherence jednotlivých tandem-páru	37
5.2	Výsledný DEM a rozdíl výsledného DEM a DEM ze SRTM	41
5.3	Závislost kvality DEM na dni měření	42
5.4	Závislost kvality DEM na délce kolmé základny	43
A.1	Snímané území	II
A.2	Mapa zájmového území	II
A.3	Ortofoto zájmového území	III
A.4	Využití území a stav vegetace podle databáze CORINE	III
A.5	DEM z mise SRTM	IV
A.6	DEM z Digitálního modelu území 1:25 000	IV
A.7	DEM vytvořený z tandem-páru 1, kolmá základna 74 m	V
A.8	DEM vytvořený z tandem-páru 2, kolmá základna 27 m	VI
A.9	DEM vytvořený z tandem-páru 3, kolmá základna 83 m	VII
A.10	DEM vytvořený z tandem-páru 4, kolmá základna 103 m	VIII
A.11	DEM vytvořený z tandem-páru 5, kolmá základna 106 m	IX
A.12	DEM vytvořený z tandem-páru 6, kolmá základna 93 m	X
A.13	DEM vytvořený z tandem-páru 7, kolmá základna 167 m	XI
A.14	Rozdíl mezi DEM z tandem-páru 1 a DEM ze SRTM	XII

A.15 Rozdíl mezi DEM z tandem-páru 2 a DEM ze SRTM	XII
A.16 Rozdíl mezi DEM z tandem-páru 3 a DEM ze SRTM	XIII
A.17 Rozdíl mezi DEM z tandem-páru 4 a DEM ze SRTM	XIII
A.18 Rozdíl mezi DEM z tandem-páru 5 a DEM ze SRTM	XIV
A.19 Rozdíl mezi DEM z tandem-páru 6 a DEM ze SRTM	XIV
A.20 Rozdíl mezi DEM z tandem-páru 7 a DEM ze SRTM	XV
A.21 Lokalizace kontrolních bodů z topografické mapy	XVI

Seznam tabulek

4.1	Parametry mise ERS	27
4.2	Parametry zařízení na družicích ERS	28
4.3	Parametry mise SRTM	29
5.1	Použité tandem-páry	34
5.2	Rozdělení koherence	37
5.3	Hodnoty koherence pro jednotlivé typy pokryvů	38
5.4	Kvalita DEM pro jednotlivé typy pokryvů	39
5.5	Kvalita výsledného DEM	40
5.6	Porovnání výšek z mapy, výsledného DEM, SRTM a DMÚ25	44
B.1	Závislost koherence na druhu pokryvu	XVIII
B.2	Porovnání výšek z mapy, jednotlivých DEM, SRTM a DMÚ25	XIX
B.3	Rozdíly výšek z mapy, jednotlivých DEM, SRTM a DMÚ25	XX

Seznam zkratek

AMI	Active Microwave Instrument (aktivní mikrovlnné zařízení)
ATSR	Along-Track Scanning Radiometer and Microwave Sounder
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CLC	CORINE Land Cover
CORINE	Coordination of Information on the Environment
DEM	Digital Elevation Model (digitální model terénu)
DEOS	Delft Institute of Earth Observation and Space Systems
DMÚ25	Digitální model území 1:25 000
DORIS	Delft object-oriented radar interferometric software
ERS	European Remote Sensing Satellite
ESA	European Space Agency (Světová kosmická agentura)
GOME	Global Ozone Measuring Experiment
GPS	Global Positioning System (globální polohový systém)
JERS	Japanese Earth-Rosources Satellite
LRR	Laser Retro-Reflector (laserový koutový odražeč)
MATLAB	Matrix Laboratory
MWR	Microwave Radiometer (mikrovlnný radiometr)
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Národní úřad pro vesmír a letectví)
NDVI	Normovaný diferenční vegetační index
NGA	National Geospatial-Intelligence Agancy (Národní agentura pro geoprostorové informace)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Národní úřad pro oceán a atmosféru)
PRARE	Precise Range and Range-rate Equipment
PRF	Pulse Repetition Frequency (frekvence opakování pulzů)
RA	Radar Altimeter (radarový altimetr)
Radar	Radio Detection and Ranging
SAR	Synthetic Aperture Radar (radar se syntetickou aperturou)
SIR	Shuttle Imaging Radar
S-JTSK	Systém Jednotné trigonometrické sítě katastrální
SLAR	Side-Looking Aperture Radar (radar bočního pohledu)
SLC	Single-Look Complex Data

SLR	Side-Looking Radar (radar bočního pohledu)
SNAPHU	Statistical-cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping
SNR	Signal-to-noise Ratio (poměr signálu k šumu)
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
WGS-84	World Geodetic System 1984 (Světový geodetický systém 1984)
WMS	Wind Scatterometer (rozptyloměr)
WMS	Web Map Service (webové mapové služby)

Kapitola 1

Úvod

Dálkový průzkum Země je v porovnání s ostatními vědními obory, zabývajícími se studiem Země ve všech různých měřítkách, disciplínou relativně mladou. Jeho základy byly položeny ve druhé polovině 20. století a od té doby se vyvíjí stále rychleji, stejně jako ostatní moderní vědy. Jednou z částí dálkového průzkumu Země je metoda radarové interferometrie, využívající družicová radarová data k získávání mnoha produktů, jmenovitě digitálních modelů terénu, map deformací či informací o atmosféře. Principem radarové interferometrie je zpracování fázových měření ze dvou či více souborů radarových dat.

V dnešní době informačních technologií je velká poptávka po rostoucím množství dat; stejně tomu je i v oblasti geografických informací. Radarová interferometrie je metodou, jejíž hlavní výhodou je získávání velkého množství trojrozměrných dat z relativně rozsáhlého území za malou časovou jednotku. Největší finanční investicí je vývoj, montáž a vypuštění družice na oběžnou dráhu, následující náklady jsou v porovnání s množstvím zaznamenávaných dat malé.

Data pořízená metodou radarové interferometrie mohou být používána v celé řadě jiných oborů, od počítačové implementace digitálních modelů terénu po analýzy rizikových událostí, jako jsou povodňové modely nebo predikce a sledování sopečné aktivity.

Před pořízením dat koncovým uživatelem je nutné znát kvalitu těchto dat; zda jsou vhodná pro daný účel a jestli není jejich cena v porovnání s kvalitou příliš vysoká. Proto je třeba dobré znát faktory, které ovlivňují kvalitu měřených dat a z nich odvozených produktů.

Cílem této diplomové práce je zhodnotit kvalitu digitálního modelu terénu (DEM - *digital elevation model*), získaného metodou radarové interferometrie, a to zpracováním měření družic ERS-1 a ERS-2 v tzv. tandem-módu. K dispozici byla data poskytnutá Laboratoří dálkového průzkumu Země fakulty stavební ČVUT Evropskou kosmickou agen-

turou.

Prvním krokem v analýze kvality je samotná tvorba DEM pomocí volně dostupného softwaru DORIS a následuje zpracování výsledků tohoto kroku.

Důležitým faktorem ovlivňujícím přesnost DEM získaného metodou radarové interferometrie je hodnota koherence, neboli spolehlivosti interferogramu - meziproduktu procesu tvorby DEM. Proto je součástí práce i rozbor rozdělení koherence, a to v závislosti na typu pokryvu. Pro tento krok je použita databáze CORINE, obsahující charakteristiku území s ohledem na využití půdy a půdní pokryv.

Samotná kvalita výsledného DEM je hodnocena podle rozdílu tohoto DEM a digitálního modelu terénu získaného jinou interferometrickou misí SRTM (data jsou k dispozici už ve formě zpracovaného a upraveného DEM). Tyto rozdíly jsou zkoumány v závislosti na délce kolmé interferometrické základny (kolmého průmětu vzdálenosti družic) a čase měření.

Dalším krokem hodnocení kvality je porovnání získaného DEM s Digitálním modelem území 1:25 000 a porovnání vybraných bodů odečtených z topografické mapy s hodnotami ve výsledném DEM.

Hodnocení kvality je v této práci omezeno na hodnocení výškové přesnosti získaného digitálního modelu terénu.

Pro účely této práce je používán termín ”snímek“ (z angl. *image*) zastupující soubor dat měřených jednou družicí a termín ”grid“ místo českého, ale zavádějícího označení ”mrázka“ nebo ”sít“ pro uspořádaný soubor pixelů. Termínem ”rozlišovací schopnost“ nebo ”rozlišení“ je myšleno kvalitativní hodnocení dat, dané převrácenou hodnotou rozlišovací jednotky.

Kapitola 2

Radarová interferometrie

2.1 Základní charakteristika radaru a technologie SAR

Radar (*Radio Detection And Ranging*) neboli radiolokátor je přístroj určený k identifikaci, zaměření a určení vzdálenosti objektů pomocí velmi krátkých elektromagnetických vln. Vysílá elektromagnetické pulzy v oboru radiového a mikrovlnného vlnění (0.3 mm–1 m) a následně zaznamenává odrazy těchto pulzů od objektů ve svém zorném poli. Výhodou radarového záření je jeho schopnost pronikat mlhou, deštěm, mrakem i smogem. To jej činí využitelným v oblastech, kde je použití jiných metod dálkového průzkumu Země díky tému fenoménům nemožné nebo velmi omezené. Také odrazivé vlastnosti povrchu jsou pro radarové záření zcela jiné než např. pro viditelné nebo infračervené záření. Na rozdíl od jiných metod se radarové snímky pořizují vždy pod šikmým úhlem, aby se omezilo společné zaznamenání odrazu signálu ze dvou odlišných míst (záznam je prováděn v závislosti na čase).

Radarová technologie používá čas, který uplyne mezi vysláním a přijetím signálu, k výpočtu vzdálenosti objektu od přístroje a intenzity příchozího signálu pro zjištění fyzikálních vlastností objektu. Monostatický radar používá pouze jednu anténu, která střídá vysílací a přijímací mód, zatímco bistatický radar se skládá ze dvou antén, jedné pro vysílání signálu a druhé pro příjem.

Prostorové rozlišení radaru v podélném směru (ve směru letu) je dáno délkou jeho antény. Rozlišovací schopnost je přímo úměrná velikosti antény.

Zvláštním druhem radarů jsou tzv. zobrazující radary (*imaging radars*) jako radar bočního pohledu (SLR – *Side-Looking Radar* nebo SLAR – *Side-Looking Aperture Ra-*

dar) nebo Radar se syntetickou aperturou (SAR – *Synthetic Aperture Radar*). Tím, že je použito snímání pod určitým úhlem do strany, se eliminuje nežádoucí součet dvou odrazů z obou stran nosiče. V dnešní době se používají tzv. koherentní radary, které znamenávají fázi i amplitudu obdrženého signálu. U SAR radarů je pohybem antény a z informací o mnoha přijatých signálech v řadě uměle vytvořena velmi dlouhá anténa. Tím je výrazně zvětšena rozlišovací schopnost ve směru azimutu.

2.2 Historie SAR interferometrie

Prvním SAR radarem na palubě družice byl v roce 1978 radar určený ke studiu oceánů umístěný na družici Seasat. Výsledky této mise podpořily smysluplnost dalších projektů a od roku 1981 bylo vypuštěno mnoho družic s těmito radary. Byly to například SIR (*Shuttle Imaging Radar*, 1981, pásmo L), Cosmos-1870 (1987, pásmo S) nebo ALMAZ-1 (1991, pásmo S).

První evropskou družicí vybavenou SAR radarem byla ERS-1 (pásmo C) vypuštěná Evropskou kosmickou agenturou (ESA – *European Space Agency*) v roce 1991. Její životnost byla plánována na 5 let, ale pracovala až do roku 2000. Původně byla navržena na sledování polárních oblastí, oceánů a ledovců (snímala pod úhlem 20.3°), takže výsledkem bylo značné topografické zkreslení. Přesto vedl systematický sběr dat spolu s řízením oběžné dráhy a pokrytí zemského povrchu k významnému vědeckému pokroku a zdokonalení metody radarového měření. V roce 1995 byla vypuštěna téměř totožná družice ERS-2 (stále ještě aktivní), což umožnilo snímkování v tzv. tandem-módu, který trval devět měsíců, kdy družice ERS-2 následovala družici ERS-1 na stejně oběžné dráze s časovým odstupem 30 minut. Díky této konfiguraci bylo stejné území snímáno v intervalu 24 hodin. Po roce 1996 se ERS-1 stala záložní družicí ve spánkovém režimu a byla používána ve zvláštních případech, většinou spojených s metodou nazývanou SAR interferometrie. Bylo jí využito například při erupcích sopky Vatnajökull na Islandu a při vážných zemětřeseních (např. v Turecku roku 1999). Obě družice ERS se pohybovaly na stejných téměř polárních drahách ve výšce 785 km. Při přeletech nad pevninou pracovaly družice v obrazovém režimu (*image mode*), zatímco nad oceány snímaly výšku a frekvenci vln (*wave/wind mode*). Data získaná v těchto misích jsou používána pro sledování stavu životního prostředí (např. monitorování úniků ropy na oceánech – společně s obrazovými radarovými daty, zkoumání vlastností mořských vln, sledování transportu sedimentů a

změn ledovcového pokryvu atd.). Na pevnině se užívají pro získání informací o využití půd, zemědělství, odlesňování, zemětřesení, deformacích zemského povrchu v důsledku vulkanické činnosti a pro účely geofyziky.

Dalšími družicemi využívajícími metody SAR radaru byly např. japonská JERS (*Japanese Earth-Resources satellite*, 1992, pásmo L), kanadská družice Radarsat (1995, pásmo C), určená především pro snímání ledovcové pokrývky v arktických oblastech, nebo speciální mise SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), jejímž úkolem bylo zdokumentovat Zemi pro účely topografického mapování.

V porovnání s klasickými geodetickými technologiemi zůstávalo radarové měření dlouho pozadu, a to v měření úhlů. Na rozdíl od lidského oka, které je samo o sobě neschopné rozlišovat rozdíly ve vzdálenostech jednotlivých objektů ve stejném směru, neumí radar od sebe odlišit dva stejně vzdálené objekty, které se však nacházejí v jiném směru. Proto je člověk vybaven dvěma očima; stejně tak je možno postupovat v případě radarového měření použitím dvou detektorů. Zpracováním dvou snímků, získaných bud' dvěma různými anténami nebo použitím opakovaných přeletů, je možno dostat jak délkové, tak úhlové měření. Fázové měření (součinová interferometrie) umožnuje porovnání relativních vzdáleností (jako část vlnové délky radarového signálu) a rozdíl v poloze detektorů zajišťuje úhlové měření důležité pro topografické mapování.

2.3 Aplikace radarové interferometrie

Geodetické aplikace družicové radarové interferometrie mohou být rozdeleny do čtyř kategorií: topografické mapování s relativní přesností 10–50 m, monitorování deformací s milimetrovou až centimetrovou přesností, tématické mapování založené na zjištování změn a mapování atmosférického zpoždění.

2.3.1 Topografické mapování

Použití radarové interferometrie pro tvorbu digitálních modelů terénu je v principu podobné jako stereografické metody (např. ve fotogrammetrii). Obě technologie jsou založeny na zpracování dvou snímků téhož území a cílem je zjištění výškových rozdílů. Hlavním rozdílem je ale fakt, že stereografické metody používají parallaxu (jejímž principem je přímé úhlové měření), zatímco radar měří čas a z něj lze vypočítat vzdálenost. Určení

paralaxy vyžaduje rozpoznání totožných míst v terénu, což může způsobovat problémy např. v zasněžených oblastech nebo na písečných pouštích. Kromě toho je tato metoda závislá na osvětlení scény sluncem a použité paprsky ve viditelném spektru nepronikají skrz mraky.

Hlavním problémem při zpracování družicových radarových měření z opakovaných přeletů je překryv, zhuštění signálu, stín (viz obr. 2.3 a odst. 2.5.2), dekorelace terénu (zvláště způsobená přítomností vegetace a poklesem koherence mezi jednotlivými přelety) a atmosférický signál v datech. Délka kolmé základny (viz odst. 2.4.1) zvyšuje citlivost na topografiu a ovlivňuje možné chyby ve zpracování, např. relativně dlouhá základna zvyšuje šum v naměřených datech kvůli geometrické dekorelacii, zatímco snižuje vliv atmosféry na výsledný DEM a naopak. Jednopřeletová interferometrická metoda není těmito chybami ovlivněna, neboť oba snímky jsou získávány zároveň a atmosférický signál je následně vyrušen při zpracování (je stejný pro oba snímky). Mise SRTM, která tuto metodu používá, byla proto navržena speciálně pro účely topografického mapování a poskytla lepší výsledky než mise s opakovanými přelety.

Dalšími družicemi používanými pro tvorbu DEM jsou ERS-1/2 (tandem-páry). Díky pravidelnému měření a pokrytí celé Země je tímto způsobem získávána mozaika DEM, která může obsahovat velká území.

Hlavními obory, kde je digitálních modelů terénu využíváno, jsou telekomunikace, hydrologické mapování a ochrana proti povodním, kartografie a geofyzika.

2.3.2 Monitorování deformací

Existuje mnoho aplikací spojených se zkoumáním deformací. První skupinou jsou seismické jevy, např. zemětřesení, půdní zlomy a tektonika. Použitím dvou snímků k tvorbě interferogramů lze získat výsledky týkající se deformací preseismických (před seismickou událostí), koseismických (v průběhu seismické události) a postseismických (po seismické události). Liší se použitými snímky: dva snímky před událostí, dva snímky ohraňující událost v čase, resp. dva snímky po události. Použitím archivních snímků v těchto metodách je možno zkoumat nebezpečné geofyzikální jevy s přesností centimetrů až milimetrů. Obzvláště kombinace radarových dat a GPS měření je pro tyto studie velmi vhodná. Další skupinou zkoumaných deformací jsou změny terénu způsobené erupcemi vulkánů. Mají rozdelení stejné jako předchozí skupina a i účel jejich studování je stejný, a to zjistit vlastnosti těchto jevů, popřípadě pomoci v předpovídání eventuálního nebezpečí.

Jinou skupinou jsou poklesy půdy způsobené např. důlní činností. Mnoho oblastí na

světě je ohroženo půdními sesuvy v důsledku těžby vody, plynů, ropy, soli nebo jiných nerostných surovin. Také stavby tunelů často způsobují poklesy půdy vedoucí ke škodám na infrastrukturu. Schopnost radarové interferometrie tyto deformace zaznamenávat závisí na rychlosti poklesu, vlivu dekorelace způsobené půdním využitím nebo vegetací a na atmosférickém signálu v interferogramech. Ačkoliv časová dekorelace představuje značné omezení pro získání spojitéch deformačních map, zůstávají některá městská území nebo určité přírodní či antropogenní útvary koherentní po dlouhé časové úseky. Těmito útvary jsou tzv. trvalé odražeče (*permanent scatterers*).

Pohyby ledovců lze také sledovat metodou radarové interferometrie, a to s přesností několika metrů. Kvůli nepřístupnosti ledovcového terénu (např. v Grónsku nebo Arktidě) poskytuje interferometrické měření neocenitelné informace o dynamice ledovců, které mohou být dále použity při studiu dalších problémů, např. při zkoumání globálního oteplování a stoupání hladiny moří.

Dalšími oblastmi monitorování deformací jsou sledování těžby v kamenolomech nebo studium pohybu umělých koutových odražečů (zařízení, která odrážejí paprsek rovnoběžně se směrem dopadu paprsku).

2.3.3 Tematické mapování

Změny v odrazivých vlastnostech povrchu mezi dvěma interferometrickými měřeními mohou způsobit změnu koherence (stupeň podobnosti mezi jednotlivými snímky) v interferogramu. Pokud odrazivé vlastnosti zůstávají nezměněné, je hodnota koherence vysoká a ovlivněná pouze geometrií snímkování, zpracováním dat a tepelným šumem.

Problémem při analýze interferometrického koherentního měření je oddělení různých zdrojů dekorelace. Je například nutné izolovat geometrickou dekorelací způsobenou vlastnostmi interferometrické základny od časové dekorelace.

2.3.4 Mapování atmosférického zpoždění

Citlivost zpoždění radarového signálu na změny atmosférické refraktivity je v radarové interferometrii považována za nepříjemný problém. Velké množství dat napříč velkým územím, kde je topografie známa a deformace povrchu jsou nulové, činí interpretaci atmosférického signálu v datech zajímavým cílem pro meteorologii a studium atmosférické dynamiky.

2.4 Princip interferometrie

Dva protínající se paprsky světla se od sebe neodrážejí, jak by se očekávalo, kdyby byly tvořeny pevnými částicemi, ale postupující světelná sféra propaguje světlo dál, jako by každý bod světelné vlny byl novým zdrojem záření o stejné frekvenci a fázi. Interferometrie světelná i interferometrie ostatních elektromagnetických záření je založena na principu postupné vlny.

Rozlišují se dva rozdílné druhy interferometrie: součtová a součinová. Produkt součtové interferometrie je získán nekoherentním součtem amplitud dvou signálů. Výsledkem jsou tzv. amplitudové proužky. Omezením této metody je fakt, že nelze zjistit, zda interferometrický signál klesá či stoupá. Dalším problémem je, že přesnost této metody je jenom zlomek amplitudového cyklu, což je většinou nedostatečné.

V součinové interferometrii je možno měřit interferometrickou fázi koherentním křížovým součinem dvou vstupních signálů. Fázové měření zaručuje větší přesnost, neboť část fázového cyklu je možno zjistit mnohem přesněji. Ve 2D aplikacích je fázový cyklus 2π uváděn jako tzv. proužek (*fringe*).

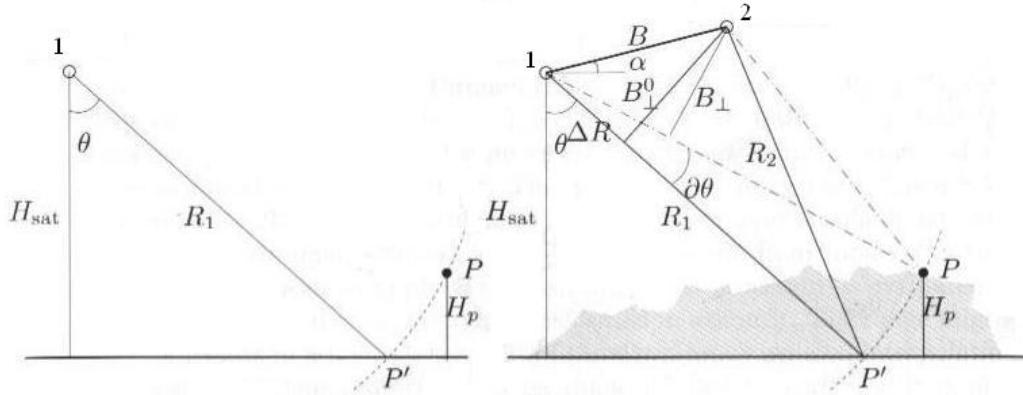
2.4.1 Topografická výška

Měření pomocí jednoho detektoru není schopné rozlišit dva body P a P' , které jsou stejně vzdálené od detektoru, ale horizontálně umístěné jinde (viz obr. 2.1). Ačkoliv intenzita vráceného signálu může indikovat přítomnost terénu, není tato informace příliš kvalitní. Tento problém je vyřešen porovnáním fázové složky odraženého záření mezi odpovídajícími si obrazovými body na dvou snímcích. Na základě této informace získané pro každý obrazový bod na snímku je následně vypočteno relativní výškové členění zobrazovaného území.

Vzdálenost B mezi dvěma detektory (družicemi) se nazývá interferometrická základna. Pro odvození a výpočty je ale důležitější její průměr do roviny kolmý k směru pulzu, který je označován jako kolmá základna (*perpendicular baseline*). Měřicí systém není schopen určit rozdíl úhlů, a proto je tato informace odvozena z délkových měření mezi oběma detektory a rozlišení (vztaženo k zemskému povrchu). Tento vztah je odvozen pomocí trigonometrie z trojúhelníků na obr. 2.1.

Snímky pořízené radarovými detektory jsou tvořeny pravidelným gridem komplexních čísel y_1 a y_2 , která se dají vyjádřit amplitudovou a fázovou složkou:

$$y_1 = |y_1| e^{j\psi_1},$$



Obrázek 2.1: Geometrická konfigurace interferometrické metody (obrázek převzat z [9])

$$y_2 = |y_2| e^{j\psi_2}.$$

Nejprve je třeba přiřadit a převzorkovat grid druhého snímku na grid prvního snímku. Následně je násobením s komplexně sdruženým číslem získán komplexní interferogram:

$$i = y_1 y_2^* = |y_1| |y_2| e^{j(\psi_1 - \psi_2)}.$$

Měřené hodnoty fáze ψ_1 a ψ_2 v obou snímcích jsou:

$$\psi_{iP} = -\frac{4\pi R_i}{\lambda},$$

kde R_1 a R_2 jsou geometrické vzdálenosti od detektorů a λ vlnová délka použitého radarového záření. Interferometrická fáze může být psána jako:

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

Její derivace je rovna:

$$\partial \phi_P = -\frac{4\pi}{\lambda} \partial \Delta R,$$

kde rozdíl vzdáleností ΔR lze vyjádřit následovně (uvážíme-li velkou vzdálenost mezi detektorem a terénem v porovnání se základnou B , můžeme situaci zjednodušit za předpokladu rovnoběžnosti paprsků):

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

Prestože nelze kvůli fázové nejednoznačnosti (*phase ambiguity*) 2π zjistit ΔR , je znám vztah:

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

kde za θ^0 je použita hodnota úhlu pohledu (*look angle*) pro referenční povrch. Dosazením do předchozí rovnice je získán vztah mezi změnou interferometrické fáze a změnou úhlu pohledu:

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

Pro výšku nad referenční plochou H_P platí:

$$H_P = R_1 \sin \theta^0 \partial\theta.$$

Dosazením z rovnice pro fázový rozdíl $\partial\phi$ získáme vztah pro závislost mezi H_P a $\partial\phi$:

$$H_P = -\frac{\lambda R_1 \sin \theta^0}{4\pi B_\perp^0} \partial\phi,$$

kde přepočtením interferometrické základny B na kolmou základnu B_\perp podle:

$$B_\perp^0 = B \cos(\theta^0 - \alpha)$$

a dosazením $\partial\phi = 2\pi$ (fázová nejednoznačnost) získáme vztah pro výškový rozdíl odpovídající fázovému posunu o velikosti 2π :

$$h_{2\pi} = -\frac{\lambda R_1 \sin \theta^0}{2B_\perp^0}.$$

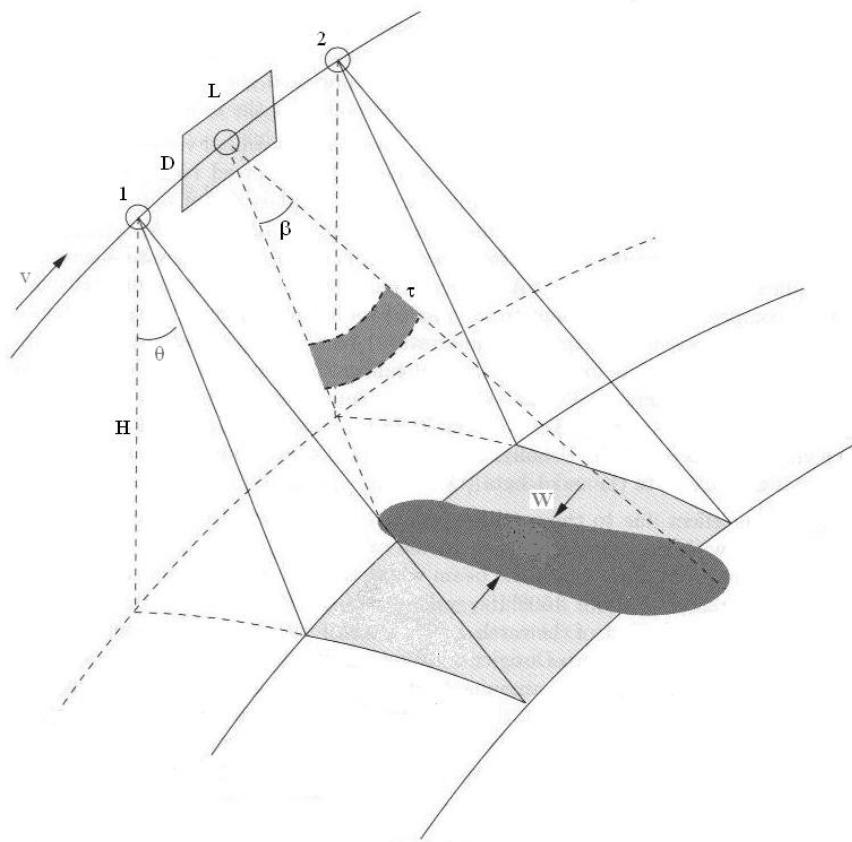
2.5 Formování obrazu

Anténa družice směruje při snímkování šikmo do strany dolů (např. u družic ERS doprava pod úhlem 20.3°) a získává tak snímky Země přibližně 100 km široké (záběr – *swath*). Snímky jsou vytvořeny z obrazu časového zpoždění a síly odraženého signálu, což závisí především na drsnosti a dielektrických vlastnostech povrchu a vzdálenosti od družice. Geometrické uspořádání je zobrazeno na obr. 2.2. Družice letící rychlostí v vysílá signály, které na Zemi ozařují pás o šířce W – tzv. stopu antény (*footprint*). Celý snímek je potom tvořený po sobě jdoucími stopami, z nichž každá reprezentuje jeden řádek snímku.

2.5.1 Rozlišovací schopnost radarového snímkování

Rozlišení ve směru azimutu je dáno velikostí antény. Úhlová šířka paprsku v kolmém a podélném směru je nepřímo úměrná rozměrům antény, tedy:

$$\beta_r = k \frac{\lambda}{D},$$



Obrázek 2.2: Geometrická situace při radarovém snímkování (obrázek převzat z [9])

$$\beta_a = k \frac{\lambda}{L},$$

kde k je konstanta, D je šířka antény a L délka antény. Šířka stopy jednoho radarového pulzu W (šířka obrazu jednoho radarového pulzu na Zemi ve směru azimutu – viz obr. 2.2) je potom:

$$W = \frac{\lambda}{L} R,$$

kde R je vzdálenost družice od Země.

Tyto vztahy platí pro radary se skutečnou aperturou. Pro případ družice ERS, jejíž anténa má rozměry $D = 1$ m a $L = 10$ m by potom šířky paprsků odpovídaly $\beta_r = 5.4^\circ$ a $\beta_a = 0.228^\circ$ a šířka stopy na Zemi $W = 4.8$ km. Rozlišení v kolmém směru je pak dáno délkou pulzu.

Radar vysílá krátké, vysoko-energetické mikrovlnné pulzy směrem k zemi a zaznamenává odrazy každého pulzu. Rychlosť vysílání pulzů je definována frekvencí opakování pulzů (PRF – *pulse repetition frequency* [Hz]). Rozlišení v kolmém směru (tzn. nejmenší

vzdálenost, kdy lze od sebe odlišit dva objekty) závisí na délce pulzu τ :

$$\Delta_r = c\tau/2,$$

kde c je rychlosť svetla.

Z tohto vztahu vyplývá, že čím kratší je délka pulzu, tím větší rozlišení lze získat. Problémem je však šum udávaný jako poměr signálu k šumu, který vyžaduje velký výkon vysílače, protože signál obdržený je řádově 10^{11} menší než signál vyslaný. Protože je výkon vysílače omezený, je také dána nejmenší možná délka pulzu, která je v případě družic ERS $\tau = 37.1 \mu s$. Této hodnotě odpovídá rozlišení v kolmém směru $\Delta_r \approx 5.5 \text{ km}$ (resp. 15 km na Zemi).

Aby bylo možno získat větší rozlišení, je použito lineární modulování frekvence (*chirp modulation*), kdy frekvence vysílaného pulzu roste lineárně s časem:

$$f(t) = st, t \in (-\tau/2, \tau/2),$$

kde s je rychlosť nárůstu frekvence.

Šířka frekvenčního pásma se následně nachází v intervalu $(f(-\tau/2), f(\tau/2))$ a je definována jako $B_f = s\tau$. Rozlišení v kolmém směru se použitím této modulace zvýší na hodnotu danou vztahem:

$$\Delta_r = c/(2B_f) \approx 9.6 \text{ m},$$

což na zemi odpovídá délce přibližně 25 m. Tuto rozlišovací schopnost lze zpětně převést na fiktivní délku pulzu o hodnotě $\tau = 64 \text{ ns}$.

Na palubě družice je přijatý signál digitalizován a odeslán na přijímací stanici na Zemi spolu s daty nutnými k dalšímu zpracování signálu (otiskem modulační frekvence, měřením šumu a kalibračním pulzem).

Při snímání je bod na Zemi ozářen několika následnými pulzy. Během těchto pulzů se jeho relativní rychlosť vzhledem k družici mění (analogicky k Dopplerovu efektu). Změna frekvence f_D je závislá na rychlosti družice v , úhlu pohledu θ a úhlu stočení (*squint angle*) ϕ_s :

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \sin \phi_s \sin \theta.$$

Střední hodnota změny frekvence, jež přísluší průchodu jednoho bodu zorným polem radaru, se nazývá *Doppler centroid* frekvence f_{DC} . Od hodnoty nulové změny ($f_D = 0$) je směr této hodnoty odchýlen o ϕ_s . Většinou jsou radarová data dodávána již opravena právě o tuto hodnotu f_{DC} , tzn. jako by byla snímána přesně ve směru kolmém na směr

letu. Změna f_D jednoho bodu na Zemi v průběhu jeho ozařování je charakterizována šířkou pásma Dopplerovy frekvence B_D a pro úzké svazky paprsků lze vyjádřit vztahem:

$$B_D = \frac{2\beta_a v}{\lambda},$$

kde β_a je šířka paprsku ve směru azimutu a v je rychlosť družice. Frekvence opakování pulzů PRF musí být větší než B_D . Šířka pásma Dopplerovy frekvence pak určuje rozlišení ve směru azimutu, a to na hodnotu podle:

$$\Delta_a = v/B_D,$$

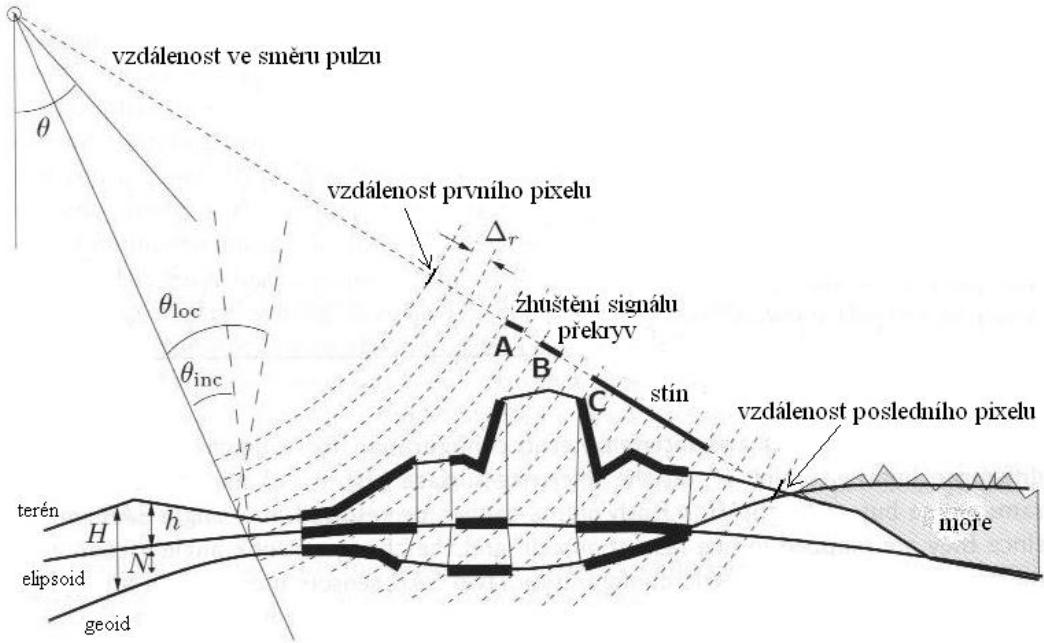
což při hodnotách $v = 7554.27$ m/s a $B_D = 1377$ Hz typických pro ERS dává rozlišení ve směru azimutu o velikosti $\Delta_a \approx 5.5$ m.

2.5.2 Zobrazovací geometrie

Souřadnicová soustava snímku je dána souřadnicemi pixelu (řádek a sloupec), které odpovídají kolmé vzdálenosti a vzdálenosti v azimutu. Protože radar snímá terén ze šikmého úhlu pohledu θ , zobrazují se převýšení zkresleně. Zobrazení se kvůli různému úhlu dopadu θ_{inc} mění také se změnou referenčního tělesa (viz obr. 2.3). Referenčnímu tělesu odpovídá úhel dopadu θ_{loc} . Zobrazení šikmého záběru do roviny odpovídající jednotlivým referenčním tělesům vykazuje charakteristické úkazy: zhuštění signálu, překryv a stín. Interferometrické výšky H jsou vztaženy k referenčnímu elipsoidu a pro přechod na ortometrické výšky h je nutné znát převýšení geoidu nad elipsoidem N .

2.6 Zpracování družicových snímků pomocí interferometrie

Cílem interferometrického zpracování je vytvořit interferogramy a georeferencované výstupy, jako např. digitální modely terénu nebo mapy vertikálních poklesů. Vstupem do zpracování jsou komplexní radarová měření poskytovaná organizacemi provozujícími družicový dálkový průzkum Země. Tato data jsou dostupná buď v předzpracované formě (SLC – tzv. *Single-Look Complex* data) nebo jako nezpracovaný produkt, jehož výhodou je menší cena, rychlejší dostupnost a možnost zpracování různými metodami.



Obrázek 2.3: Zobrazovací geometrie radarového snímání (obrázek převzat z [9])

2.6.1 Výběr snímků

Tento krok je pro radarovou interferometrii pravděpodobně jedním z nejdůležitějších, protože k dispozici je většinou větší množství snímků, z nichž lze vytvořit mnoho interferometrických párů. Kritéria výběru záleží na konkrétním účelu zpracování. Hlavními parametry jsou typ detektoru, dostupná data, časové a prostorové rozložení interferometrických základen, vlastnosti zkoumaného terénu a stav atmosféry v době snímání.

Z kritérií týkajících se nosiče aparatury a detektoru jsou důležitá vlnová délka, šířka frekvenčního pásmá, poměr signálu k šumu (SNR – *Signal-to-noise ratio*), sklon oběžné dráhy družice a perioda opakování přeletu nad stejným územím. Družice pro opakování radarové měření využívají většinou radarové záření z frekvenčních pásem L (o vlnové délce $\lambda = 23$ cm) až X ($\lambda = 3$ cm). Při použití záření z frekvenčních pásem s vyšší frekvencí je měření znehodnoceno ionosférickým signálem, naopak u menší frekvence je měření příliš citlivé na vliv počasí. Vlnová délka také ovlivňuje hustotu interferometrických proužků způsobených topografií nebo deformacemi. Citlivost k topografii a deformacím je daná kombinací vlnové délky a poměru signálu k šumu. Šířka frekvenčního pásmá v kolmém směru podmiňuje maximální (kritickou) délku základny a rozlišení v kolmém směru. Parametry letu družice jako sklon oběžné dráhy a perioda opakování přeletu ovlivňují plochu

zemského povrchu, která je pokryta měřením, výskyt oblastí bez měřených dat (okolo pólů) a čas, který uplyne mezi dvěma přelety nad jedním místem. Energetická náročnost detektoru a dalších přístrojů na družici může limitovat délku a čas snímání detektoru za jeden oběh. Také přítomnost přístroje určujícího přesnou polohu družice a řízení dráhy letu družice ovlivňují přesnost interferometrické základny.

Dalším aspektem pro výběr dat po typu nosiče a detektoru je dostupnost dat. Pro některé družice jsou k dispozici on-line databáze, které nabízejí možnost výběru a přímého objednání dat. Vzhledem k tomu, že se jednotlivé snímky ze sousedících oběžných drah překrývají a že jsou dostupná měření ze vzestupných i sestupných drah, je možno si vybírat data s různou geometrií záznamu. Kvůli maximální délce základny je vhodné vybírat snímky, jejichž úhel pohledu se liší maximálně o 4 úhlové minuty (platí pro ERS). Lze také dopředu objednávat data se speciálními požadavky na zobrazovací geometrii.

Pro účely výběru dat pro interferometrii je vhodné používat grafické znázornění závislosti časové základny (době mezi pořízením jednotlivých interferometrických snímků) na kolmé základně. Kolmá základna (*perpendicular baseline*) ukazuje míru citlivosti k topografické výšce a velikosti dekorelace způsobené fázovým posunem. Vhodná délka základny záleží na členitosti terénu a pohybuje se v rozmezí 100 až 500 m. Časová základna pro topografické mapování by měla být v ideálním případě co nejkratší, aby se omezil vliv časové dekorelace. Pro interferogramy znázorňující deformace terénu je vhodná minimální prostorová základna, protože zmenšuje vliv topografického signálu a šum způsobený fázovým posunem. Ideální časová základna závisí na předpokládané deformaci; jestli je plynulá nebo náhlá (např. u zemětřesení). Pro plynulé deformace je hlavním parametrem pro výběr časové základny rychlosť deformace a je třeba, aby byl patrný dostatečný poměr signálu k šumu mezi hledanou hodnotou deformace a ostatními faktory, které se do interferogramu promítají (šum, atmosférický signál, zbytkový topografický signál). Pro náhlé deformace je vhodná krátká časová základna ohraničující v čase sledovanou událost.

Pro výběr snímků jsou důležité také vlastnosti terénu (členitost terénu, sklon, typ a množství vegetace a vliv lidské činnosti). První dvě vlastnosti terénu musí být brány v úvahu zároveň s volbou základny a detektoru a mohou vést k použití interferogramů z vzestupných a sestupných drah. Zbylé vlastnosti terénu poukazují na možnou velikost očekávané dekorelace. Pro zjištění přibližné dekorelace (u tandem-párů) způsobené vegetací může být např. použit normovaný diferenční vegetační index (NDVI) získaný z měření NOAA AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*). Vhodné je také vybírat data ze stejného ročního období, aby se zamezilo vlivu sezónních faktorů (sníh, opadávání listí). Pro zkoumání deformací je třeba uvažovat typ, velikost a množství očekávaných

deformací.

Posledním faktorem pro výběr dat může být předpokládaná velikost atmosférického signálu. Zdrojem těchto informací jsou satelitní snímky nebo pozemní synoptická meteorologická data. Ukazatelem významného atmosférického signálu může být především spojité proudění v troposféře často spojené s vertikální refrakcí. Také výběr nočních snímků (pokud je to možné) namísto denních zmenší pravděpodobnost atmosférického signálu.

Předpoklady popsané výše mohou vést k optimálnímu výběru možných snímků a interferometrických kombinací. Také ale mohou indikovat, že radarová interferometrie není nejlepším nástrojem pro splnění účelu výzkumu.

2.6.2 Předzpracování

Pokud se začíná zpracováním původních nezpracovaných dat (tzv. *raw data*), je nejprve třeba zkontrolovat, zda data nejsou nesouvislá, tzn. jestli např. nechybí řádky. Pokud chybí jen malá část řádků, je možno tyto řádky zkopirovat z okolních, takže změny při zpracování budou pouze malé.

Pří interferometrickém zpracování by mělo mít spektrum vlnění co největší překryv v podélném směru. Pokud se pracuje s předzpracovanými data, je většinou nutné provést filtrování v podélném směru, protože geometrie požadovaných snímků není známa předem. Při použití nezpracovaných dat je možno získat maximální spektrální překryv vypočtením průměrné frekvence Doppler centroidu v každém snímku. Tímto způsobem je zjištěna středová frekvence pro podélný směr snímače a následně je maximální spektrální překryv mezi oběma snímky zajistěn použitím frekvence o hodnotě průměru středových frekvencí obou snímků.

2.6.3 Koregistrace

Zásadní podmínkou pro interferometrické zpracování je subpixelová koregistrace (přiřazení) obou snímků. V závislosti na čase snímání (odpovídajícím příslušné části oběžné dráhy) může být mezi dvěma interferometrickými snímky posun v podélném směru (směru letu) až několik tisíc řádků. Posun ve směru příčném (kolmém na směr letu) odpovídá délce rovnoběžné základy (*parallel baseline*) dělené délkou pixelu (*range posting*), což může činit až několik desítek pixelů.

Pro urychlení procesu koregistrace je tento krok dělen do dvou částí: hrubé a jemné koregistrace. Při hrubé koregistraci je odsazení mezi oběma snímků odhadnuto bud' opticky podle odpovídajících si bodů na obou snímcích nebo pomocí parametrů oběžné dráhy získaných z údajů družic. Následná jemná koregistrace využívá metody automatické korelace pro koregistraci o subpixelové přesnosti.

- *Hrubá koregistrace:* Nejprve je pro libovolný bod na orbitě prvního snímku (a libovolnou vzdálenost ve směru kolmo k letu) zjištěna poloha tohoto pixelu na elipsoidu. Následně je podle této pozice iterativně hledán pixel na druhém snímku (v okolí odpovídající orbity a vzdálenosti ve směru kolmo k letu) podle správné hodnoty Dopplerova posunu. Polohy pixelu na obou snímcích odpovídají konkrétnímu času snímání vzhledem k prvnímu řádku snímku a díky tomu jsou známy řádkové souřadnice, ve kterých se tyto pixely nacházejí. Posun ve směru letu je tedy rozdíl mezi těmito řádky. Posun v kolmém směru je spočten z délky rovnoběžné základny dělené velikostí pixelu v podélném směru (*range posting*). Takto je možno zjistit podélný posun mezi oběma snímků s přesností do deseti pixelů a příčný posun s přesností několika pixelů.
- *Jemná koregistrace:* V tomto kroku je zjištěn posun se subpixelovou přesností výpočtem korelace na úrovni pixelových posunů pro velké množství oblastí (oken) rovnoměrně rozmištěných po celém snímku. V okolích lokálních maxim korelace jsou hodnoty korelace interpolovány a tímto způsobem nalezena maxima korelace na subpixelové úrovni.

2.6.4 Převzorkování a interpolace

Interferometrické vyhodnocení dvou snímků představuje práci s odpovídajícími si pixely. Proto je třeba převzorkovat druhý snímek na grid snímku prvního. Nejprve se ze vzorkovaného zaznamenaného signálu rekonstruuje původní spojitý signál (pomocí interpolace) a následně se tento rekonstruovaný signál převede na nový vzorkovaný signál odpovídající prvnímu snímku.

2.6.5 Filtrování

Šum v interferogramu může vést k problémům při rozbalování fáze nebo jinak znesnadnit interpretaci dat. Existuje několik příčin šumu v interferogramu, které se projevují velmi

podobně. Při interferometrickém zpracování je nutno provést filtrování, a to před tvorbou interferogramu (*a priori*) a po tvorbě interferogramu (*a posteriori*).

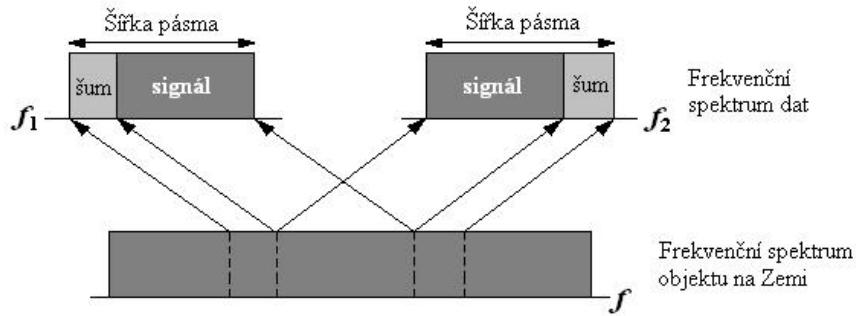
- Prvním problémem, který je řešen filtrováním, je spektrální posun (*spectral shift*). Ten je způsoben rozdílem mezi spektrem objektu na Zemi a spektrem dat, která jsou zaznamenávána detektorem, viz obr. 2.4. Spektrum objektu je funkcí jeho vlastností (radarové odrazivosti terénu) a je nezávislé na snímacím systému. Datové spektrum odráží vlastnosti snímacího systému. Spektrální posun frekvencí je způsoben rozdílem v úhlech, pod kterými se radarový signál odráží od terénu. Oba snímky obsahují část společného spektra, ale navíc ještě dvě nepřekrývající se oblasti, které jsou interpretovány jako šum. Ten je třeba z měření odstranit pomocí pásmového filtru, bud' odvozeného z parametrů orbit družice nebo (pro terén, který nemá konstantní sklon) odhadem frekvence proužků (*fringe*) filtrováním po jednotlivých sloupcích snímku.
- Pokud nejsou zpracovávána originální naměřená data, je třeba provést spektrální filtrování v podélném směru. Dodávaná data jsou většinou zpracována s průměrnou frekvencí Doppler centroidu a nejsou následně vhodná pro přímé zpracování jakéhokoliv interferometrického páru. Rozdíl mezi frekvencemi Doppler centroidu může být způsoben rozdílným úhlem mezi směrem pohledu a příčným směrem (*squint angle*) jednotlivých detektorů nebo sbíhavostí oběžných druh (orbit). Řešením je filtrování podobné jako v předchozím případě.
- *Aposteriorní filtrování:* Před samotným rozbalováním fáze je možno provést další filtrování za účelem snížení šumu (např. před vizualizací dat). Existuje několik metod, jejichž výsledkem jsou ostřejší proužky. Používají se okna pohybující se napříč interferogramem a zvýrazňující různé vlastnosti.

2.6.6 Tvorba interferogramu

Interferogram je získán komplexním násobením odpovídajících si pixelů obou snímků:

$$i = y_1 y_2^* = |y_1| |y_2| e^{j(\psi_1 - \psi_2)},$$

kde hvězdička označuje komplexně sdružené číslo pixelu druhého snímku.



Obrázek 2.4: Spektrální posun

2.6.7 Výpočet fáze pro referenční těleso

Pro správný postup zpracování je třeba znát průběh elipsoidu, k němuž se fyzický terén vztahuje, a vypočítat hodnoty fáze, o níž má být měření opraveno. Pro určitý počet pixelů na snímku jsou spočteny odpovídající pravoúhlé prostorové souřadnice obou druzic a odpovídajícího bodu na referenčním elipsoidu a následně je vypočtena rovnoběžná základna a fáze. Průběh fáze na celém snímku je určen např. interpolací polynomem. Tato fáze je po pixelech následně odečtena od interferogramu.

2.6.8 Výpočet koherence

Pro rozbalení fáze je třeba vědět, jak je získaný interferogram spolehlivý. Koherence je definována jako:

$$\gamma = \frac{E \{ y_1 y_2^* \}}{\sqrt{E \{ |y_1|^2 \} E \{ |y_2|^2 \}}},$$

kde E je střední hodnota argumentu. Hodnota koherence leží v intervalu $\langle 0, 1 \rangle$. Pro výpočet se použije vzorce:

$$|\hat{\gamma}| = \frac{\left| \sum_{n=1}^N y_1 y_2^* \right|}{\sqrt{\sum_{n=1}^N |y_1|^2 \sum_{n=1}^N |y_2|^2}},$$

kde N je počet okolních pixelů v okně použitém pro odhad koherence pro centrální pixel. Hodnota koherence ukazuje kvalitu interferogramu v malé oblasti okolo určitého pixelu.

2.6.9 Rozbalení fáze

V radarové interferometrii je předmětem měření a zaznamenání relativní fázový signál, pohybující se v rozmezí $(-\pi, \pi)$. Pro praktické užití je ale třeba získat absolutní fázový signál, který lze následně přepočítat do podoby vertikálních deformací nebo digitálního modelu terénu. Na rozdíl od tzv. zabalení fáze je proces rozbalení složitý. Pro možnost řešení je zaveden předpoklad, že nárůst fáze mezi dvěma sousedními pixely je v intervalu $(-\pi, \pi)$. Gradient zabalé fáze je očekáván stejný jako gradient rozbalé fáze, a tedy se fáze rozbaluje pouhým přičítáním fázových gradientů, které může začít na libovolném místě interferogramu. Problém nastane, pokud je skutečný gradient větší než polovina cyklu. Potom se chyba šíří dalším přičítáním celým zbylým územím. Základním předpokladem je, že součet rozdílů fází mezi sousedními pixely (tvořícími uzavřený obrazec) je nulový. Pokud je hodnota jiná (-2π nebo $+2\pi$), znamená to existenci reziduí (způsobených např. šumem). Tato rezidua lze při rozbalování spojit se sousedními rezidui, čímž se dosáhne znova součtu nula pro jeden řetězec. V praxi je tento krok mnohem složitější a jsou stále vyvíjeny nové algoritmy pro rozbalení fáze.

2.6.10 Georeferencování

Po rozbalení fáze a jejím přepočtení na výšku (postup naznačen v odst. 2.4) jsou k dispozici získaná výška a souřadnice pixelů v systému radarových snímků. Ty je třeba přepočítat do vhodného geodetického systému, např. WGS84 (Φ, Λ, H). Pro každý pixel snímku je spočtena velikost vektoru vzdálenosti od referenční orbity a ze souřadnice řádky, počátečního času a frekvence vysílání pulzů (PRF) je vypočten stavový vektor polohy družice. Pro výpočet polohového vektoru bodu je následně použita hodnota Doppler centroidu a vektor rychlosti družice, společně s místním poloměrem Země.

Kapitola 3

Kvalita DEM

3.1 Faktory ovlivňující kvalitu DEM

Kvalita produktů radarové interferometrie, tedy digitálních modelů terénu i map deformací terénu, je závislá na míře korelace snímků, které jsou při interferometrickém zpracování použity. Limitujícím faktorem kvality je tedy velikost dekorelace. Dekorelace je definována v [9] jako šum způsobený chybami, které mají korelační délku menší než je obvyklá velikost okna pro odhadování koherence.

Fázový šum může být vyjádřen jako funkce absolutní hodnoty koherence, která je odhadnuta buď z měřených dat nebo odvozením z vlastností snímače, vlastností povrchu, podmínek snímání a algoritmů pro zpracování. Existuje několik zdrojů/typů dekorelace:

- *geometrická dekorelace*
- *dekorelace způsobená různým Doppler centroidem*
- *dekorelace způsobená průnikem signálu do povrchové vrstvy*
- *dekorelace způsobená tepelným (nebo systémovým) šumem*
- *časová dekorelace*
- *dekorelace způsobená chybami koregistrace a interpolace*
- *typ povrchu a pokryvu*
- *vliv atmosféry*

Výsledná korelace lze vyjádřit násobením jednotlivých členů:

$$\gamma_{celk} = \gamma_{geom} \times \gamma_{DC} \times \gamma_{obj} \times \gamma_{tepl} \times \gamma_{cas} \times \gamma_{kor}$$

3.1.1 Geometrická dekorelace

Geometrická dekorelace je výsledkem různého úhlu odrazu signálu pro obě družice. Roste úměrně s velikostí spektrálního posunu mezi dvěma snímkováním. Geometrická dekorelace je dána délkou kolmé základny. Pro tvorbu DEM je vhodné použít co největší možnou kolmou základnu, protože pak fázový cyklus 2π odpovídá menšímu výškovému rozdílu. Existují však jistá omezení pro délku kolmé základny. Pokud by byla příliš dlouhá, obsahoval by interferogram pouze šum. To je způsobeno příliš velkým spektrálním posunem, kdy se už datová spektra (viz. obr. 2.4) jednotlivých snímků nepřekrývají. Dochází tak k dekorelaci fázové, amplitudové i frekvenční. Proto existuje tzv. kritická délka základny:

$$B_{\perp,krit} = \lambda (B_f/c) R \tan(\theta_{odraz} - \zeta),$$

kde λ je vlnová délka, B_f šířka frekvenčního spektra, R vzdálenost družice, θ_{odraz} úhel odrazu a ζ sklon terénu. Pro rovinatý terén je kritická základna družice ERS přibližně 1.1 km. Pro topografické mapování je však praktické volit hodnoty maximálně okolo 500 m. Pro diferenční interferometrii je naopak vhodné použít snímky s nejkratší možnou kolmou základnou. Potom není nutné z interferogramu odstraňovat topografickou složku a interferogram je pak tvořen pouze složkou deformační a atmosférickou.

Hodnota geometrické korelace je:

$$|\gamma_{geom}| = \frac{B_{\perp,krit} - B_{\perp}}{B_{\perp,krit}}$$

pro $|B_{\perp}| \leq B_{\perp,krit}$, pro ostatní hodnoty kolmé základny je geometrická korelace nulová.

Geometrická dekorelace může být omezena filtrováním v průběhu zpracovávání snímků, nevýhodou je ale zhoršení rozlišení.

3.1.2 Dekorelace způsobená odlišným Doppler centroidem

Ekvivalentem geometrické dekorelace pro podélný směr je dekorelace způsobená odlišnými hodnotami Doppler centroidu pro každé snímkování. S rostoucím rozdílem frekvencí Doppler centroidu Δf_{DC} roste i dekorelace. Hodnota korelace je:

$$|\gamma_{DC}| = 1 - \Delta f_{DC}/B_a$$

pro $|\Delta f_{DC}| \leq B_a$, kde B_a je šířka frekvenčního pásma ve směru azimutu. Pro ostatní hodnoty $|\Delta f_{DC}|$ je korelace nulová. V případě družic ERS, na nichž je uplatněn princip *yaw steering* (natáčení antény proti směru letu kvůli zmenšení efektu Doppler centroidu),

je tato dekorelace minimální, ale už pro tandem páry je nutno ji brát v úvahu. Pokud jsou pro zpracování použity předzpracované snímky (SLC snímky), je vhodné pro zlepšení kvality interferogramu provést filtrování ve směru azimutu.

3.1.3 Dekorelace způsobená průnikem signálu do povrchové vrstvy

Dekorelace způsobená průnikem signálu do povrchové vrstvy (*volume decorrelation*) je způsobena vrstvou materiálu (vegetace, písku, ledu), kterým signál částečně prochází, odráží se od dalších vrstev a vrací se zpět do antény radaru. Jedná se o dlouhovlnné záření, které může pronikat pod povrch těchto vrstev. Hodnota objemové dekorelace potom obsahuje informaci o fyzických vlastnostech vrstvy, např. její tloušťce nebo vertikálním rozdělení. Tato dekorelace je závislá na tloušťce vrstvy, odpovídající např. výšce vegetace, koeficientu slábnutí signálu v dané vrstvě a na fázi vztažené ke spodnímu terénu.

3.1.4 Tepelná dekorelace

Vliv tepelného šumu na kvalitu interferogramu je dán poměrem signálu k šumu SNR daného systému a je závislý na parametrech antény a dalších čásech přijímacího a vysílačního zařízení:

$$\gamma_{tepl} = \frac{1}{1 + SNR^{-1}},$$

kde SNR je poměr signálu k šumu (*signal-to-noise ratio*), vyjádřený jako $SNR = P_r/P_n$, resp. $SNR[\text{dB}] = P_r[\text{dB}] - P_n[\text{dB}]$. P_r je energie příchozího signálu a je závislá na výkonu vysílače, vzdálenosti mezi anténou a povrchem, směrovém zisku antény, rozměrech antény, vlnové délce záření, ploše osvětlené jedním pulzem a účinném průřezu radaru. P_n je energie termálního šumu přijímacího systému závislá na teplotě přijímače a šířce frekvenčního pásma přijímače. Podle [9] je u družic ERS $P_r = -109.3$ dB a $P_n = -121.0$ dB a tedy $SNR = 11.7$ dB.

3.1.5 Časová dekorelace

Nejdůležitějším faktorem ovlivňujícím koherenci je časová základna. Pro tvorbu digitálního modelu terénu je vhodné volit co nejkratší časovou základnu. V tom případě jsou vhodné družicové mise, které používají metodu jednoho přeletu (tzn. mají dvě antény

a oba interferometrické snímky jsou pořízeny ve stejný okamžik) nebo mise s možností tandem-párů (např. ERS-1/2). U tandem-párů je časová základna jeden den, což zaručuje dostatečnou koherenci u většiny typů povrchů. Výjimkou je vzrostlá vegetace a vodní plochy. Vzhledem k tomu, že vodní plochy netvoří velké procento povrchu a jejich výšku lze úspěšně interpolovat z výšky okolních břehů, není jejich nízká koherence velkým problémem. Situace je jiná u vzrostlých vegetací. Ty většinou pokrývají velké plochy a nevhodně vybrané snímky s nízkou koherencí pak nelze použít pro tvorbu DEM. Je proto účelné vybírat snímky pořízené mimo vegetační a zimní období (tedy na jaře a na podzim). Vhodné měsíce jsou tedy např. březen, duben, říjen a listopad pro území střední Evropy, je možné také použít snímky ze zimních měsíců, když se nevyskytují sněhové srážky. V zalesněných oblastech je už časová základna 1 měsíc málo vhodná pro tvorbu DEM.

Pro tvorbu map terénních deformací je naopak vhodné použít snímky s delší časovou základnou. Vhodná základna závisí také na předpokládané rychlosti poklesů terénu (která se může lišit v závislosti na typu poklesů a jejich příčinách, např. poddolování, sesuvy půdy atd.). Při delších časových základnách (nad 1 měsíc) je ale nutno i pro mapování deformací vzít v úvahu přítomnost vegetace nebo stav polí (zorání), které by mohly znehodnotit výsledné hodnoty poklesů. Nejhodnější jsou potom zastavěné oblasti, které mohou zůstat koherentní i několik let.

3.1.6 Dekorelace způsobená chybami koreRegistrace a interpolace

Výsledek zpracování záleží také na přesné subpixelové koreRegistraci dvou snímků. Chyby v přiřazení způsobují ztrátu koherence a tím i fázový šum. Už posun o jednu rozlišovací jednotku způsobí úplnou dekorrelaci obou snímků. KoreRegistrální korelace odpovídá vztahu:

$$\gamma_{kor} = \frac{\sin(\pi\mu_r)}{\pi\mu_r},$$

pro $\mu_r \in \langle 0, 1 \rangle$, kde μ_r je část rozlišovací vzdálenosti v kolmém směru Δ_r . Pro ostatní hodnoty μ_r je korelace nulová. Podobný vztah platí pro rozlišení ve směru azimuTu. Při převzorkování jednoho snímku na druhý je třeba tento krok provést s přesností na desetinu jednotky rozlišení. Provádí se při něm rekonstrukce spojitého vyslaného signálu ze vzorkovaného záznamu použitím interpolační funkce a následně převedení tohoto signálu do gridu druhého snímku. Při volbě interpolační funkce je třeba volit kompromis mezi přesností interpolace a výpočetní náročností.

3.1.7 Vliv atmosféry, srážkové činnosti a sněhu

Na šíření radarového signálu má velký vliv stav atmosféry v okamžiku snímání. Důležité je proto vědět, zda se nad zájmovým územím vyskytovaly teplotní anomálie, bouřková mračna atd. Ty mohou totiž výrazně měnit dráhu signálu a tím i zaznamenanou fázi. Nejlépe je tedy používat snímky pořízené při klidném stavu atmosféry; nejvhodnější jsou noční snímky. Také je nutné zjistit, zda se před snímkováním nevyskytly nad územím srážky, neboť obsah vody v půdě ovlivňuje vlastnosti odraženého signálu (zvyšuje intenzitu a negativně působí i na fázi). Je tedy vhodné použít snímky, na nichž se srážky nevyskytovaly nejméně dva dny, v zimě i déle. Také přítomnost sněhové pokrývky znehodnocuje získané snímky.

3.1.8 Typ povrchu a pokryvu

Nejvhodnější pro interferometrické zpracování jsou plochy, které se v čase nemění. U nich zůstává koherence vysoká. Jsou to zastavěná území a plochy bez vegetace (s výjimkou ploch, od nichž se radarové záření odráží). Těmito místy mohou být například skalnatá území v horách. U nich koherence zůstává stejná i po několik let. Další typy povrchu, např. neobdělávaná území či zemědělské plochy mimo vegetační období mají dostatečnou koherenci až po několik měsíců. Území pokrytá vegetací jsou vhodná jen v případech, kdy je vegetace řídká nebo není příliš vysoká, takže neovlivní výslednou fázi odraženého záření. Hustá a vzrostlá vegetace vykazuje velmi nízkou koherenci i při krátkých časových základnách, a není proto vhodná pro tvorbu digitálního modelu terénu interferometrickou metodou. Také hladké asfaltové plochy nejsou příliš vhodné, protože se většina signálu (stejně jako u vodních ploch) zrcadlově odráží a do snímače tedy přichází minimum odraženého signálu.

Kapitola 4

Družice a použitá data

4.1 Družice ERS (*European Remote Sensing Satellite*)

V roce 1991 byla vypuštěna první družice Evropské kosmické agentury (ESA – *European Space Agency*) nazvaná ERS-1. Na její palubě byl umístěn SAR radar, radarový altimetr a jiné přístroje určené k měření teploty povrchu oceánů a větru na moři. V roce 1995 k ní byla přidána družice stejné konstrukce ERS-2, která navíc nesla snímač pro výzkum atmosférického ozónu. Tyto dvě družice byly v době vypuštění nejdůmyslnějším systémem pro pozorování Země, který byl kdy v Evropě vytvořen. Za jejich působení bylo sesbíráno mnoho dat týkajících se zemského povrchu, oceánů a polárních oblastí, která mj. výrazně přispěla k zaznamenání přírodních katastrof (záplav, zemětřesení) v odlehlých částech světa. Obě družice byly zkonstruovány téměř identicky, což umožnilo jejich využití pro měření pomocí tandem-párů, tedy snímků stejného území pořízených s přesným odstupem pouhého jednoho dne. Tato funkčnost trvala nepřetržitě po devět měsíců, v letech 1995–1996. Poté byla družice ERS-1 uvedena do pohotovostního režimu a v něm sloužila až do března 2000, čímž výrazně překročila svou plánovanou provozní dobu.

4.1.1 Technické parametry

Družice mise ERS byly vypuštěny na elipsoidickou, téměř polární, slunečně-synchronní dráhu. Parametry oběžné dráhy jsou uvedeny v tab. 4.1.

Rychlosť	7554.27 m
Sklon ob. dráhy	98.5°
Výška letu	785 km
Doba oběhu	100 min
Počet přeletů za den	13
Cyklus opakování	35 dní

Tabulka 4.1: Parametry mise ERS

Na palubě družice ERS byly umístěny následující měřicí zařízení:

- AMI (*Active Microwave Instrument* – aktivní mikrovlnné zařízení), které je tvořeno radiolokátorem SAR pro radarové snímání a měření výšky vln a rozptyloměr (WMS – *Wind Scatterometer*) pro měření směru větru
- RA (*Radar Altimeter* – radarový altimetr) pro měření svislých výšek
- ATSR (*Along-Track Scanning Radiometer and Microwave Sounder*) tvořený infračerveným radiometrem pro měření teploty hladiny oceánů s přesností 0.1 K
- MWR (*Microwave Radiometer* – mikrovlnný radiometr) pro měření obsahu vodních par v atmosféře
- GOME (*Global Ozone Measuring Experiment* – přístroj pro globální monitorování stavu ozónové vrstvy, pouze na ERS-2) poskytující celosvětovou mapu stavu ozónu každé tři dny; také odhaluje stopy dalších plynů, aerosolů a mikročásticového znečištění ve spodních částech atmosféry
- LRR (*Laser Retro-Reflector* – laserový koutový odražeč) pro přesné určení vzdálosti družice od pozemních stanic
- PRARE (*Precise Range and Range-rate Equipment* – přesný systém pro měření dáhy)

Parametry zařízení na palubě družice ERS jsou uvedeny v tab. 4.2.

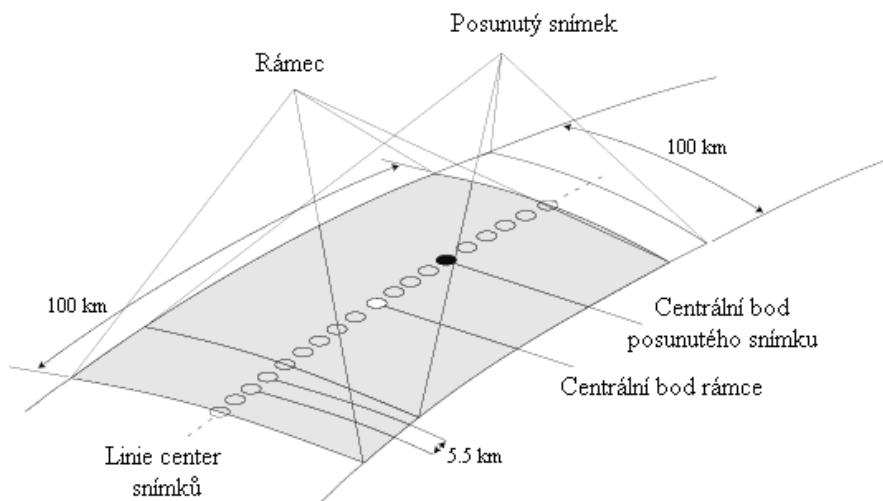
zařízení	frekvence	prost. rozlišení	záběr
AMI – SAR (obrazový režim)	5.3 GHz (pámo C)	30 m	100 km
AMI – SAR (vlnový režim)	5.3 GHz (pámo C)	10 m	5x5 km
AMI – WMS	5.3 GHz (pámo C)	50 km	500 km
RA	13.8 GHz (pámo K)	10 cm (výška)	1.3°
ATSR		1 km	500 km

Tabulka 4.2: Parametry zařízení na družicích ERS

4.1.2 Radarová data získaná z mise ERS

Data pořízená SAR radarem v obrazovém režimu jsou dostupná v digitálním formátu v několika formách:

- Originální, nezpracovaná data (RAW – *Raw Data*) odpovídající jednomu rámci společně s pomocnými daty nutnými ke zpracování
- Předzpracovaná data (SLC – *Single-Look Complex data*), kde je měření zachováno v komplexní podobě



Obrázek 4.1: Rozložení snímků ERS (obrázek převzat z [5])

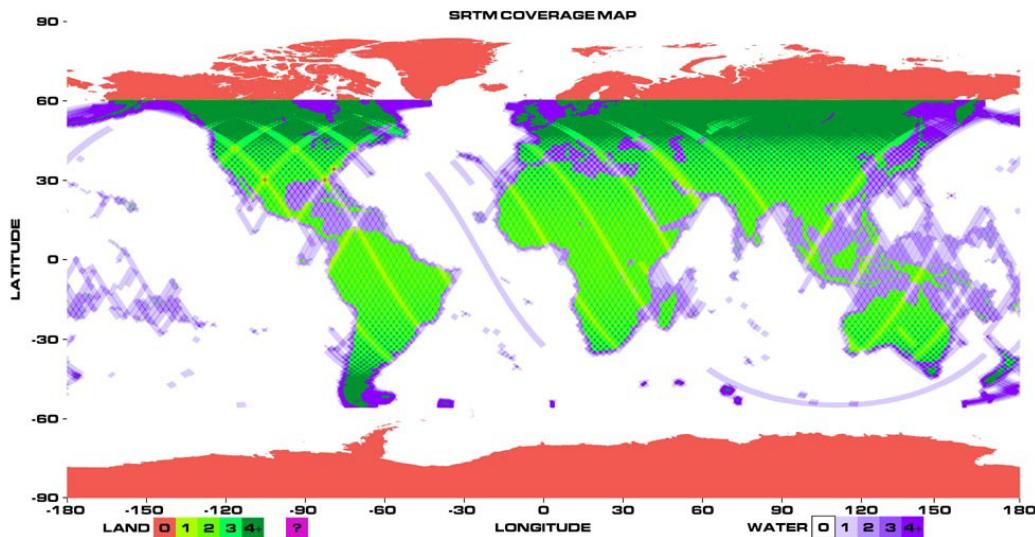
4.2 Mise SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*)

V únoru 2000 vynesla družice Space Shuttle Endeavour na oběžnou dráhu speciální radarový systém, který měl za úkol získávat výšková data v celosvětovém měřítku za účelem vytvoření digitální topografické databáze Země o velkém rozlišení. SRTM byl mezinárodním projektem pod vedením americké Národní agentury pro geoprostorové informace (NGA – *National Geospatial-Intelligence Agency*) a Národního úřadu pro vesmír a letectví (NASA – *National Aeronautics and Space Administration*). Součástí měřicí aparatury byly dvě antény, jedna na palubě družice a druhá upevněná na rameni ve vzdálenosti 60 m od družice. Družice mise SRTM byla vypuštěna na oběžnou dráhu se sklonem dráhy 57° , čímž bylo umožněno snímat území v rozmezí 60° severní šířky a 56° jižní šířky. Za jedenáct dní snímání tak mise získala data z 80 % zemského povrchu. Cílem mise bylo použitím X-band a C-band radarové SAR technologie získat topografická data vytvořit z nich digitální topografickou mapu o rozlišení 30 m x 30 m, absolutní výškové přesnosti 16 m, relativní výškové přesnosti 10 m a horizontální přesnosti 20 m.

Rychlosť družice	7.5 km/s
Sklon ob. dráhy	57°
Výška letu	233 km
Délka mise	11 dní (11.–22. 2. 2000)
Počet přeletů	16/den, 176 celkem
Šířka záběru	225 km

Tabulka 4.3: Parametry mise SRTM

Z celkově zmapovaných 80 % zemského povrchu bylo zmapováno 99.97 % celkově mapovaného povrchu nejméně jednou, 94.59 % nejméně dvakrát, 49.25 % nejméně třikrát a 24.10 % nejméně čtyřikrát.



Obrázek 4.2: Pokrytí zemského povrchu misí SRTM (obrázek převzat z [10])

4.2.1 Data získaná v misi SRTM

Původní získaná data prošla mnoha zpracovatelskými kroky, a je tedy k dispozici několik verzí dat. Prvním krokem bylo interferometrické zpracování, bloková úprava po kontinentech (pro odstranění zbytkových chyb) a mozaikování, takže meziproduktem jsou digitální modely terénu dostupné v jednotkách o velikosti $1^\circ \times 1^\circ$. Tato data jsou k dispozici jako verze 1.

Druhým krokem zpracování byla úprava získaných DEM, která zahrnovala odstranění mezer, vyrovnání výšky hladiny a určení pobřežní čáry. Takto získaná data jsou označována jako verze 2.

Data dostupná přes ftp server [17] mají rozlišení $1' \times 1'$ (SRTM1 – pro oblast USA), $3' \times 3'$ (SRTM3 – pro ostatní území) nebo $30' \times 30'$. Třívteřinová data byla získána průměrem 9 jednovteřinových pixelů. Rozlišení odpovídá na rovníku v horizontálním směru 30 m, resp. 90 m pro SRTM1, resp. SRTM3.

Výše popsané digitální modely terénu byly získány z radarového měření v pásmu C. Měření v pásmu X poskytuje vyšší přesnost digitálního modelu terénu, ale data v porovnání s daty z pásmu C pokrývají menší území a není možné vytvořit globální DEM.

4.3 Data CORINE

V roce 1985 byl Evropskou komisí vytvořen program CORINE (*Coordination of Information on the Environment*). Cílem bylo získat ucelený přehled o životním prostředí a přírodních zdrojích v Evropském společenství. Později byly do programu zahrnuty také státy střední a východní Evropy.

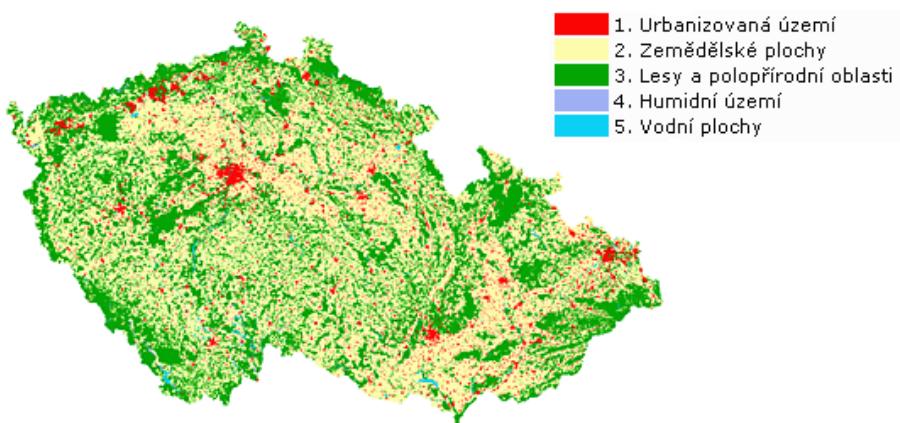
V programu CORINE jsou řešeny tři aspekty životního prostředí: krajinný pokryv (*Land Cover*), biotopy a ovzduší.

Cílem podprojektu CORINE Land Cover (CLC) bylo vytvořit databázi krajinného pokryvu jednotnou metodikou pro celé zájmové území. Ta byla vytvořena na základě klasifikace snímků z družice LANDSAT pořízených v letech 1986–1995. Zpracováním těchto snímků vznikla databáze CLC90 a výstupem byla mapa vegetačního pokryvu v měřítku 1:000 000 obsahující 44 tříd.

Kvůli potřebě aktualizace byly od roku 1999 tvořeny nové databáze CLC2000 a IMAGE2000. Obsahem projektu IMAGE2000 je databáze snímků Evropy z družice LANDSAT s prostorovým rozlišením 25 m, která byla výchozím podkladem pro obnovu databáze krajinného pokryvu CLC2000 a zjišťování změn. Současně byly opravovány chyby v databázi CLC90.

Databáze CLC2000 má tři úrovně: pro měřítka menší než 1:1 000 000 obsahuje 5 tříd, pro měřítka v rozmezí 1:500 000 až 1:1 000 000 obsahuje 15 tříd a pro měřítka nad 1:100 000 obsahuje 44 tříd, z nichž se ale pouze 28 vyskytuje na území ČR.

V současné době se připravuje nová aktualizace databáze CLC2005, jejíž dokončení je plánováno na rok 2007.



Obrázek 4.3: Databáze CORINE2000, úroveň 1 pro měřítka menší než 1:1 000 000 (obrázek převzat z [2])

4.4 Digitální model území 1:25 000

Digitální model území 1:25 000 (DMÚ25) je produktem Vojenského geografického a meteorologického úřadu České republiky. Obsahem je vektorová databáze topografických prvků, získaná digitalizací vojenských topografických map 1:25 000 po jejich 4. obnově. DMÚ25 je tvořena mozaikováním leteckých měřických snímků, sběrem dat, místním šetřením a fotogrammetrickým doměřením. Každá vrstva DMÚ25 odpovídá jednomu souboru topografických objektů. Střední polohová chyba DMÚ25 je 18 m. Souřadnicovým systémem DMÚ25 jsou S-42, S-JTSK, WGS-84 a Bpv.

4.5 Použité programy

4.5.1 DORIS

Volně dostupným softwarem pro interferometrické zpracování je DORIS (*Delft object-oriented radar interferometric software*) vyvinutý institutem DEOS (*Delft Institute of Earth Observation and Space Systems*) na nizozemské univerzitě v Delftu. Umožňuje vytvářet interferometrické produkty z radarových SLC dat.

Vstupními daty mohou být radarová měření z družic ERS, ENVISAT, JERS a RADARSAT. V DORISu jsou implementovány kroky interferometrického zpracování od originálních dat až po tvorbu interferogramu. Krok rozbalení fáze je nutno provést v jiném softwaru. Zbylé části zpracování (georeferencování až tvorba DEM nebo map deformací) jsou součástí DORISu.

4.5.2 SNAPHU

SNAPHU (*Statistical-cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping*) je volně dostupným softwarem pro rozbalení fáze. Tento program je založen na použití informací o intenzitě zaznamenaného signálu pro identifikaci pravděpodobné přítomnosti překryvu nebo zhuštění signálu způsobené topografií (tedy větším sklonem). Vstupními datovými soubory jsou soubor zabalené fáze, koherenční soubor a soubor s intenzitou.

Při použití programu DORIS pro interferometrické zpracování je při kroku rozbalení fáze volán program SNAPHU, který vypočte hodnoty rozbalené fáze a vrátí je programu DORIS pro pokračování procesu zpracování.

4.5.3 MATLAB

MATLAB (*Matrix Laboratory*) je programové prostředí a programovací jazyk určený pro numerické výpočty, modelování, tvorbu algoritmů, počítačové simulace a další aplikace. Umožňuje jednoduchou manipulaci s maticemi, zobrazování funkcí a dat a tvorbu programů.

V této práci byl MATLAB používán pro zpracování dat získaných interferometrickým zpracováním družicových dat v programu DORIS a pro tvorbu grafů a obrázků.

Kapitola 5

Analýza přesnosti DEM

5.1 Postup zpracování ERS dat

Cílem práce bylo posoudit kvalitu digitálního modelu terénu získaného ze zpracování interferometrických tandem-párů ERS. K dispozici byla následující data ze vzestupných drah družic ERS-1 a ERS-2 (jednotlivé scény byly ve formátu SLC):

			ERS-1		ERS-2			
tandem	frame	track	datum	orbit	datum	orbit	B_{\perp} [m]	$h_{2\pi}$ [m]
1		394	7.1.1996	23428	8.1.1996	03755	73	118
2		394	17.3.1996	24430	18.3.1996	04757	27	322
3		122	2.4.1996	24659	3.4.1996	04986	83	123
4	2583	122	7.5.1996	25160	8.5.1996	05487	103	99
5		394	26.5.1996	25432	27.5.1996	05759	106	82
6		122	11.6.1996	25661	12.6.1996	05988	93	110
7		394	7.11.1999	43468	8.11.1999	23795	167	52

Tabulka 5.1: Použité tandem-páry

Hodnota $h_{2\pi}$ je výška odpovídající fázové nejednoznačnosti 2π . *Frame* je horizontální řada snímků o stejné zeměpisné šířce, *track* je řada snímků z trasy opakovaných přeletů a *orbit* je pořadové číslo snímků v jednom *tracku*. Délka kolmé základny B_{\perp} je převzata z výsledkových souborů generovaných programem DORIS a tato hodnota je pouze přibližná (je jiná pro každý pixel snímku).

Tato data se vztahují k území severních Čech (viz obr. A.1) a bylo z nich vybráno

území společné pro obě trasy ohraničené body o zeměpisných souřadnicích WGS84:

$$\begin{aligned} & [13^{\circ}33'39.6'', 50^{\circ}41'54.6''] \quad \dots \quad [14^{\circ}04'06.6'', 50^{\circ}41'54.6''] \\ & \vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \\ & [13^{\circ}33'39.6'', 50^{\circ}22'51.6''] \quad \dots \quad [14^{\circ}04'06.6'', 50^{\circ}22'51.6''] \end{aligned}$$

Výřez mapy odpovídající tomuto území je znázorněn na obr. A.2 ze serveru [19] a jako ortofotomapa na obr. A.3 z téhož zdroje. Velikost tohoto území je přibližně 36.0 x 35.3 km.

Ke zpracování byl použit program DORIS, a to jeho jednotlivé procesy v pořadí:

- výběr scény pro *master* (hlavního) snímek (*m-readfiles*, *m-crop*, *m-porbits*)
- výběr scény pro *slave* (vedlejšího) snímek (*s-readfiles*, *s-crop*, *s-porbits*)
- hrubá koregistrace (*coarseorb*, *coarsecorr*)
- filtrování ve směru azimutu (*m-filtazi*, *s-filtazi*)
- jemná koregistrace (*fine*, *coregmp*)
- převzorkování *slave* snímku na grid *master* snímku (*resample*)
- filtrování obou snímků v kolmém směru (*filtrange*)
- tvorba interferogramu (*interfero*)
- výpočet a odečtení fáze pro referenční elipsoid (*comprefpha*, *subtrrefpha*)
- výpočet koherence (*coherence*)
- aposteriorní filtrování fáze (*filtphase*)
- rozbalení fáze pomocí programu SNAPHU (*unwrap*)
- výpočet výšky a transformace do referenčního souřadnicového systému (*slant2h*, *geocode*)

Výsledky této části použité v dalším zpracování byly binární soubory obsahující georeferencované souřadnice bodů zájmového území (*phi.raw*, *lambda.raw*, *heights.raw*) a hodnoty koherence pro odpovídající body (*coherence.raw*), které byly pomocí příkazu *lonlathei2ascii* převedeny na textové soubory a následně zpracovány v MATLABu.

5.1.1 Zpracování dalších datových souborů

Dalšími použitými daty byla data mise SRTM, volně dostupná na internetu, viz [17]. Pro oblast Evropy jsou dostupná data s rozlišením 3" ve směru zeměpisné délky i zeměpisné šířky.

Pro porovnání kvality výsledného digitálního modelu terénu s topografickými daty bylo použito vrstevnic Digitálního modelu území 1:25 000, dostupného formou webových mapových služeb (WMS – *Web Map Service*) na internetovém Portálu veřejné správy ČR [2].

Posledním vstupem do zpracování byla data projektu Corine [5] mapující využití území a stavu vegetace. Tento soubor dat byl získán také z WMS internetového Portálu veřejné správy ČR [2].

Všechna data byla převedena na jednotný grid (382 řádků a 610 sloupců), odpovídající 3 úhlovým vteřinám, což na Zemi činí jednotku plochy o průměrné šířce a výšce 59 m, resp. 92 m.

Polohová přesnost DEM není v této práci zkoumána. Pro účely analýzy výškové přesnosti byly digitální modely terénu z jednotlivých tandem páru vzájemně referencovány, a to optickým odhadem posunu ve vertikálním směru na základě určení několika identických bodů. Stejně byly posunuty i ostatní datové soubory (SRTM data, CORINE, DMÚ25). Posun v rámci jednotlivých DEM činil maximálně 15" v horizontálním směru.

Vzhledem k přetrvávajícímu trendu v datech získaných interferometrickým zpracováním byl tento trend odstraněn pomocí dat mise SRTM. Rozdílem mezi jednotlivými DEM z tandem-páru a hodnotami DEM ze SRTM byla proložena regresní rovina, která byla následně odečtena od dat DEM z tandem-páru. Protože při rozbalení fáze došlo téměř u všech tandem-páru k chybám v severozápadní části území (viz např. obr. A.18), nebyly hodnoty z této části území použity při odstraňování trendu. Takto získané digitální modely terénu byly dále používány k analýze hodnocení kvality DEM.

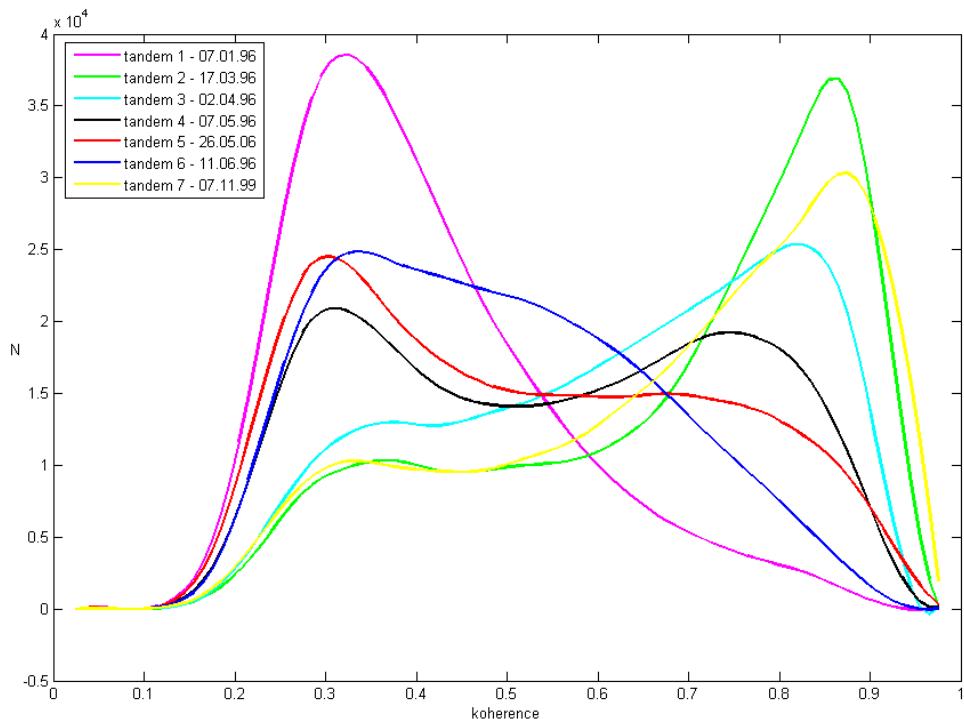
5.1.2 Analýza koherence

Koherence mezi odpovídajícími si pixely dvou snímků by měla být ukazatelem úspěšnosti rozbalování fáze. Proto je část této práce věnována také zkoumání koherence. Hodnoty koherence pro celá území jednotlivých tandem-páru jsou znázorněny v příloze u DEM, ke kterým přísluší (viz obr. A.7). Rozdělení hodnot koherence pro jednotlivé snímky je uvedeno v tab. 5.2.

tandem	koherence [%]		
	0–0.33	0.33–0.66	0.66–1
1	34	59	7
2	8	29	63
3	10	41	49
4	20	44	36
5	24	47	29
6	21	61	18
7	9	31	60

Tabulka 5.2: Rozdělení koherence v intervalech 0–0.33–0.66–1

Na obr. 5.1 je znázorněna četnost pixelů jednotlivých interferogramů v závislosti na jejich koherenci.



Obrázek 5.1: Histogram koherence jednotlivých tandem-párů

Další zpracování bylo provedeno na základě dat CORINE, znázorňující využití půdního pokryvu. Pro účely této práce byly třídy datového souboru CORINE rozděleny do 6 kategorií (viz obr. A.4):

- urbanizovaná území
- povrchové doly, haldy a skládky
- nezavlažovaná pole
- nízká zeleň, louky
- lesy
- vodní toky a plochy

Závislost koherence na typu pokryvu je uvedena v tab. 5.3. Tabulka obsahuje hodnoty průměrné koherence pro danou třídu a jejich směrodatnou odchylku. Klasifikace jednotlivých pixelů byla provedena podle dat souboru CORINE. Hodnoty koherence pro celou škálu tříd databáze CORINE jsou uvedeny v příloze v tab. B.1.

typ pokryvu	DEM 1	DEM 2	DEM 3	DEM 4
urbanizovaná území	0,44	0,14	0,72	0,13
povrchové doly, skládky	0,44	0,14	0,76	0,13
nízká zeleň, louky	0,37	0,11	0,62	0,21
nezavlažovaná pole	0,46	0,16	0,79	0,14
lesy	0,34	0,09	0,49	0,17
vodní toky a plochy	0,32	0,10	0,52	0,23
celá scéna	0,41	0,13	0,68	0,16
typ pokryvu	DEM 5	DEM 6	DEM 7	průměr
urbanizovaná území	0,54	0,16	0,56	0,16
povrchové doly, skládky	0,66	0,18	0,65	0,17
nízká zeleň, louky	0,46	0,18	0,49	0,16
nezavlažovaná pole	0,61	0,19	0,51	0,16
lesy	0,33	0,12	0,35	0,11
vodní toky a plochy	0,35	0,14	0,33	0,12
celá scéna	0,51	0,17	0,49	0,15

Tabulka 5.3: Hodnoty koherence pro jednotlivé typy pokryvů; průměrná hodnota a směrodatná odchylka

5.1.3 Analýza závislosti přesnosti DEM na typu pokryvu

Pro jednotlivé digitální modely terénu z tandem-párů byly vypočteny hodnoty aposteriorních směrodatných odchylek výšky podle:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta H_i^2}{n}},$$

kde ΔH_i jsou rozdíly výšek vypočtených DEM a digitálního modelu terénu z dat mise SRTM a n je počet pixelů ve scéně. Hodnoty pro jednotlivé pokryvy (získané použitím dat CORINE) jsou v tabulce tab. 5.4. Jako hodnota \emptyset_1 je označena průměrná směrodatná odchylka pro jednotlivé pokryvy. V posledním sloupci je uvedena směrodatná odchylka pro rozdíl digitálního modelu terénu z dat mise SRTM a digitálního modelu terénu DMÚ25.

	1	2	3	4	5	6	7	\emptyset_1	DMU25
urbanizovaná území	16	26	13	15	37	50	12	24	9
povrchové doly, skládky	23	31	17	18	34	50	6	26	42
nízká zeleň, louky	17	83	19	43	107	64	66	57	10
nezavlažovaná pole	13	22	11	13	15	34	5	16	8
lesy	28	58	25	46	97	60	59	53	17
vodní toky a plochy	24	38	20	35	105	64	64	50	17
celá scéna	18	45	16	27	57	49	32	35	13

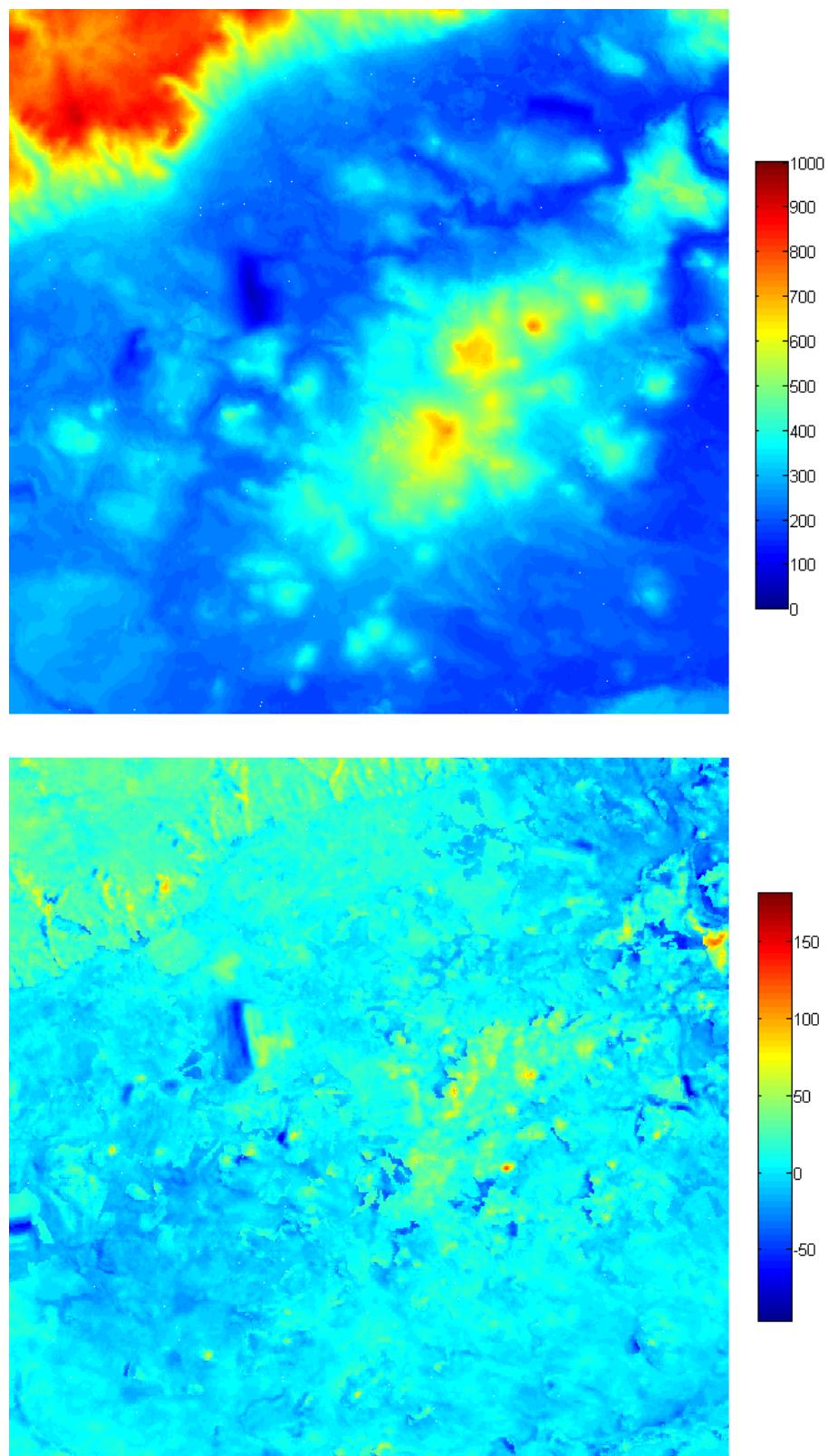
Tabulka 5.4: Kvalita DEM pro jednotlivé typy pokryvů vyjádřená směrodatnou odchylkou σ [m]

5.1.4 Tvorba výsledného DEM

Výsledný digitální model terénu byl vytvořen váženým průměrem z jednotlivých digitálních modelů terénu z tandem-párů, kde váha byla dána převrácenou hodnotou směrodatné odchylky pro jednotlivé typy pokryvů (viz tab. 5.4), přičemž nulová váha byla přiřazena automaticky pokryvům, pro které směrodatná odchylka překročila hodnotu $\sigma_H = 30$ m. Výsledný DEM je znázorněný na obr. 5.2 a hodnota jeho směrodatné odchylky (vztažena k referenčním DEM SRTM a DMÚ25) pro jednotlivé pokryvy a celková směrodatná odchylka je:

typ pokryvu	$\sigma_{DEM-SRTM}$	$\sigma_{DEM-DMU}$
urbanizovaná území	15	16
povrchové doly, skládky	16	41
nízká zeleň, louky	15	17
nezavlažovaná pole	10	13
lesy	24	22
vodní toky a plochy	19	21
celá scéna	16	19

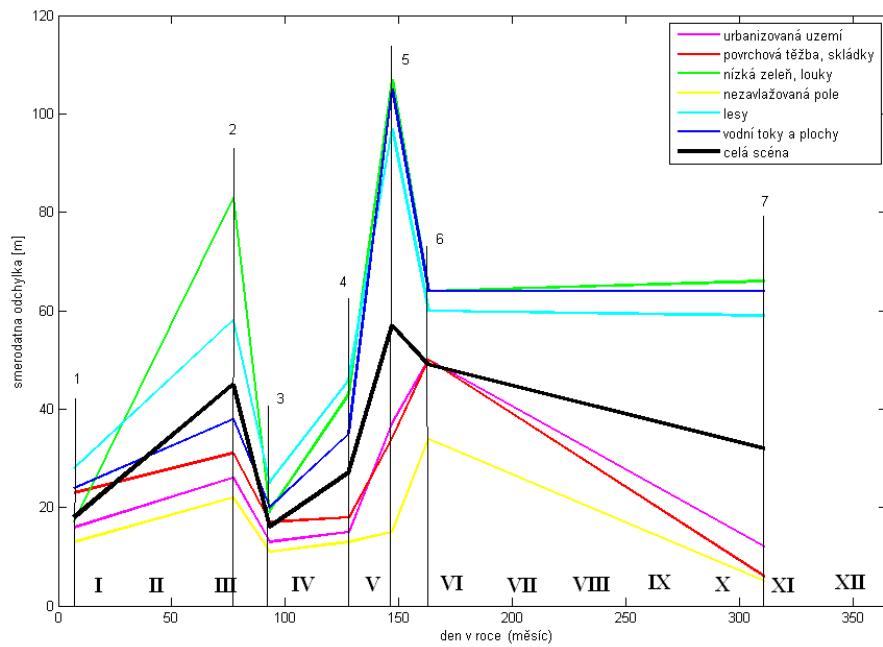
Tabulka 5.5: Kvalita výsledného DEM v závislosti na typu pokryvu a celková kvalita vyjádřená směrodatnou odchylkou [m]



Obrázek 5.2: Výsledný DEM a rozdíl výsledného DEM a DEM ze SRTM

5.1.5 Závislost kvality DEM na dni měření

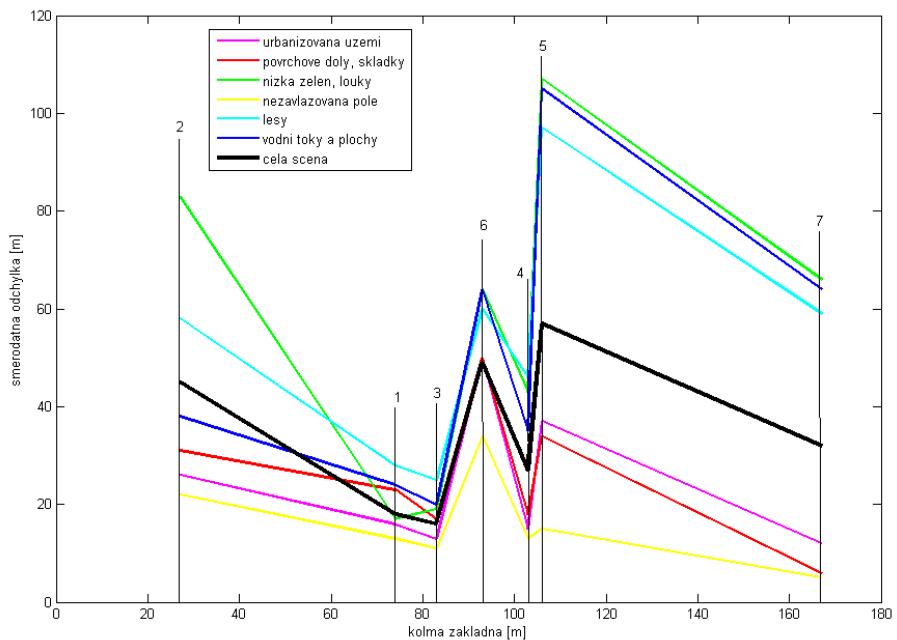
Závislost kvality digitálního modelu terénu na dni měření v roce je zobrazena v grafu na obr. 5.3. Na y-ové ose jsou hodnoty směrodatné odchylky výsledného DEM pro jednotlivé typy pokryvů i pro celou scénu.



Obrázek 5.3: Závislost kvality DEM na dni měření

5.1.6 Závislost kvality DEM na délce kolmé základny

V grafu na obr. 5.4 jsou vyobrazeny závislosti směrodatné odchylky na délce kolmé základny pro jednotlivé typy pokryvů a pro celou scénu.



Obrázek 5.4: Závislost kvality DEM na délce kolmé základny

5.1.7 Porovnání výsledného DEM a topografické mapy

Pro porovnání kvality výsledného digitálního modelu terénu bylo v turistických topografických mapách vybráno 26 výškových kót rovnoměrně rozdělených po celé scéně a dobře identifikovatelných na digitálním modelu terénu. Jednalo se o vrcholové body geomorfologických jednotek daného území, výšky center měst a obcí nebo jinak význačné body (např. výška vodních nádrží). Tyto hodnoty a jejich rozdíly jsou uvedeny v tab. 5.6 pro topografickou mapu, výsledný DEM, DEM SRTM a DMÚ25. Hodnoty pro data z jednotlivých tandem-párů jsou uvedeny v příloze v tab. B.2. Rozmístění těchto kontrolních bodů je znázorněno na obr. A.21.

Místo	Mapa	DEM	SRTM	DMÚ	(2-3)	(2-4)	(2-5)
Hlava u Ústí n. L.	510	481	500	499	29	10	11
Lovosice	151	159	155	151	-8	-4	0
Libochovice	166	185	170	175	-19	-4	-9
Chabařovice	175	175	176	178	0	-1	-3
Milešovka	836	715	798	800	121	38	36
Oblík u Loun	509	416	474	436	93	35	73
Bílina	214	205	201	200	9	13	14
Puklá skála u Flájí	839	773	805	799	66	34	40
Meziboří	512	476	482	476	36	30	36
Osek	307	303	306	304	4	1	3
Duchcov	201	213	221	225	-12	-20	-24
Křížový vrch u Třebenic	449	402	434	399	47	15	50
Litvínov	339	324	329	325	15	10	14
Radčice u Mostu	279	261	269	275	18	10	4
Židovský vrch u Dubí	619	546	598	557	73	21	62
Teplice	228	212	226	225	16	2	3
Trupelník u Bíliny	355	332	347	344	23	8	11
Štrbecký vrch u Bíliny	475	405	461	434	70	14	41
Labe v Ústí n. L.	140	145	132	150	-5	8	-10
Strážiště u Lovosic	362	318	331	307	44	31	55
jezero Barbora u Teplic	262	242	244	251	20	18	11
Hazmburk u Libochovic	418	327	368	349	91	50	69
vodní nádrž Fláje	711	723	739	759	-12	-28	-48
Ostrý u Lovosic	552	455	508	482	97	44	70
Lišnice u Mostu	265	248	228	225	17	37	40
Loučná	959	914	936	934	45	23	25
průměrný rozdíl					34	15	22
směrodatná odchylka					51	24	37

Tabulka 5.6: Porovnání výšek z mapy, DEM, SRTM a DMÚ25 [m]

5.1.8 Zhodnocení výsledků

Data, která byla k dispozici, pocházejí z velké části (šest ze sedmi interferometrických párů) z první poloviny roku 1996 (poslední pár je z listopadu 1999) a jsou v tomto časovém úseku rovnoměrně rozložena. Na obrázcích znázorňujících koherenci těchto snímků (viz obr. A.7) lze sledovat vývoj tohoto faktoru v čase.

První, lednový, snímek má celkově nízkou koherenci, a můžeme tedy předpokládat, že se mezi pořízením radarových dat oběma družicemi změnily odrazivé vlastnosti terénu (a to na téměř celé ploše zájmového území); vzhledem k ročnímu období pravděpodobně napadl sníh. Březnová data (druhý tandem-pár) vykazují vysokou koherenci ve všech oblastech s výjimkou výše položených míst. Je obtížné interpretovat, zda se také u tohoto páru vyskytlo sněžení ve vyšších polohách či jestli je nízká koherence způsobena pouze vegetací přítomnou v těchto místech. K tomu by byly potřeba dodatečné informace o meteorologické situaci v tyto dva dny.

I další interferometrické páry mají hodnotu koherence závislou na ročním období, a tedy i na stavu vegetace. Patrný je rozdíl mezi tandem-páry číslo 5 (květen) a 6 (červen), kde u červnových dat znatelně poklesla hodnota koherence u třídy "nezavlažovaná pole", což pravděpodobně způsobilo nepřesné určení trendu (s ohledem na velikost plochy, která je pokryta touto třídou) a následným větším rozdílem mezi výškami DEM vytvořeným z tohoto interferometrického páru a DEM ze SRTM.

Vliv koherence je značný, ale příklad prvního tandem-páru ukazuje, že i z dat s nízkou koherencí může být vytvořen celkem přesný DEM, na rozdíl od např. druhého tandem páru, kde ani relativně vysoká hodnota koherence na většině území nezaručila správné rozbalení fáze na celém území. Existuje možné vysvětlení, že na tvorbu DEM má vliv také skutečnost, zda je v datech velký rozptyl koherence (tandem-pár 2) či nikoli (tandem-pár 1), nezávisle na absolutní velikosti koherence.

Rozbalení fáze je také výrazně ovlivněno délkou kolmé základny. U druhého tandem-páru je hodnota $B_{\perp} = 23$ m, což způsobuje vysokou hodnotu fázové nejednoznačnosti (v případě tohoto tandem-páru 322 m), a chyba ve fázovém rozdílu se tedy promítne do výsledného DEM mnohem znatelněji, než u interferometrických páru s delšími základnami.

Typ pokryvu úzce souvisí s koherencí, a tedy i s výslednou kvalitou získaného DEM. Zájmové území, které bylo zkoumáno v této práci, je z velké části pokryto třídou "nezavlažovaná pole", jejíž koherence je po velkou část roku poměrně vysoká (v analyzovaných datech byla nižší pouze v červnu, odhlédne-li se od dat lednového tandem-páru, která mohou být ovlivněna přítomností sněhu).

Naopak oblasti s výskytem vzrostlé vegetace (většinou hornatá území) vykazují trvale velmi nízkou koherenci, která u pěti ze sedmi zpracovávaných tandem-párů způsobila špatné rozbalení fáze v severozápadní části území a výškové rozdíly DEM v této oblasti dosahují řádově stovek metrů (což odpovídá hodnotě fázové nejednoznačnosti).

Z tohoto důvodu je vhodné, aby byla území ohraničená pásy pokryvů s očekávanou nízkou koherencí zpracovávána samostatně a teprve později propojována s okolními oblastmi. To platí zejména pro území rozdělená na nespojité části např. širokými řekami nebo horskými pásmi pokrytými vzrostlými lesy.

Ze získaného digitálního modelu terénu je patrné, že i výška urbanizovaných území je určena celkem přesně. To vychází pravděpodobně i z faktu, že veškerá města se v této oblasti nacházejí ve středních nadmořských výškách (nejedná se tedy o žádné extrémní hodnoty výšek, které by byly zpracováním znehodnoceny). Také koherence je pro tato území dostatečně vysoká; v případě jednodenního rozdílu mezi dvěma interferometrickými snímky je pravděpodobné, že se odrazivé vlastnosti těchto území nezměnily, a to ani když se jedná o nesouvislou městskou zástavbu s množstvím vegetace v okolí.

Naopak přítomnost řeky ve zkoumané oblasti (v případě této práce Labe ve východní části území) do značné míry kvalitu DEM ovlivňuje, a to negativně. Odděluje malou část na východ od řeky, která má znatelně horší kvalitu právě z důvodu nespojitosti s okolním terénem.

Posledním z výrazných topografických objektů v této oblasti je mnoho povrchových dolů a skládek. Ty se vyznačují vysokou koherencí a i rozdíl mezi výsledným DEM a DEM ze SRTM je relativně malý. Jiný je situace u rozdílu vzhledem k DMÚ25. Protože v těchto oblastech nejsou většinou zakresleny žádné vrstevnice, je obtížné pro tato území vytvořit vypovídající digitální model terénu. Proto jsou i rozdíly výšek v těchto oblastech zřetelně odlišné.

Závislost přesnosti DEM na charakteru terénu (zda se jedná o rovinu či o hornaté území) se pro zkoumanou oblast kryje s vlivem pokryvu, protože v zájmové oblasti jsou většinou členitá území s větším sklonem pokryta lesy. Není tedy možné přesně oddělit tyto dva vlivy.

Kapitola 6

Závěr

Metoda radarové interferometrie je mocným nástrojem pro tvorbu digitálního modelu terénu. Nespornou výhodnou je rychlosť získávání aktuálních radarových dat a nepříliš náročný proces zpracování. Pro praktické užití je však třeba rozhodnout, zda jsou dostupná data dostatečně kvalitní a lze jich použít pro daný účel.

Před pořízením dat je možné určit vhodnost jejich použití podle několika faktorů. Těmi jsou délka kolmé interferometrické základny, časová základna, charakter území, typ pokryvu terénu a atmosférická situace v době radarového snímání. Role délky kolmé základny i časové základny je poměrně jasné. Kolmá základna určuje vhodnost dat z hlediska geometrické konfigurace a podmiňuje použití dat pro tvorbu DEM (delší základna) nebo na druhé straně pro mapování deformací (kratší základna). Časová základna může indikovat míru změny odrazové charakteristiky terénu a podílí se tedy také na rozhodování mezi uplatněním dat pro DEM či mapování deformací.

Posoudit vliv dalších dvou faktorů – charakteru území a typu pokryvu a jejich vzájemného působení – je o poznání složitější. Většinou není předem známo, jaký byl stav vegetace a pokud jsou tyto dodatečné informace k dispozici, ani ty nezaručí přesné určení jejich vlivu na výsledný produkt.

Nejobtížněji se dá v procesu tvorby DEM eliminovat vliv atmosférického signálu. Přítomnost sněhu nebo dešťových srážek lze získat z dat meteorologických stanic, ale přesný stav atmosféry nad velkým územím a v dostatečném rozsahu lze jen těžko zjistit.

Dalším faktorem ovlivňujícím kvalitu výsledného DEM je spektrální filtrování při interferometrickém zpracování. Pro optimální výsledek je třeba zvolit vhodné parametry, které jsou závislé na charakteru území, tedy jeho sklonu a členitosti.

Cílem této diplomové práce bylo zhodnotit přesnost digitálního modelu terénu vytvoreného z několika tandem-párů ERS. Přesnost (resp. směrodatná odchylka) DEM

vytvořených z jednotlivých tandem-pářů se pohybovala v rozmezí 18–57 m pro celou scénu, pro jednotlivé pokryvy byla však rozptyl mnohem větší (5–107 m). Výsledný DEM pak (po zpracování a použití pouze vybraných tříd u různých interferometrických pářů) dosáhla 16 m. Této relativní přesnosti (vzhledem k DEM ze SRTM dat) však bylo dosaženo po mnoha úpravách a není proto reprezentativní pro jeden interferometrický pár.

Celkově nižší přesnost byla způsobena charakterem území, kde je velká část hornaté oblasti pokryta lesy, a tedy je rozbalení fáze ztíženo nízkou koherencí tohoto pokryvu.

I přes teoreticky nižší přesnost danou vlivem délky základen nebo koherencí jednotlivých povrchů může být výsledek tvorby DEM poměrně dobrý, závisí na území vybraném pro zpracování i dalších parametrech tohoto zpracování (použitý algoritmus pro rozbalení fáze, filtrování).

Pro budoucí rozvoj užití radarové interferometrie v našich podmírkách je vhodné zkoumat kvalitu digitálního modelu terénu tvořené pro jednotlivé typy území (hornaté, rovinaté území) zvlášť a pak jejich následného propojení, stejně tak jako parametry pro filtrování, vhodné rozbalovací algoritmy a vliv atmosféry na radarová data.

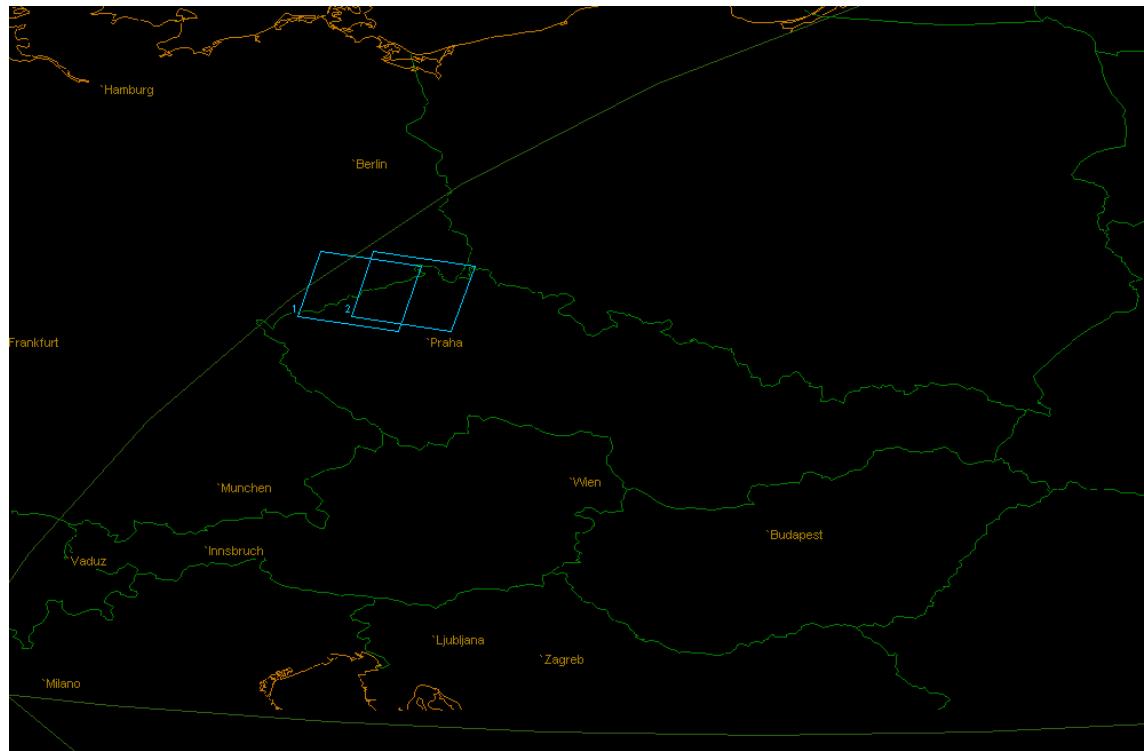
Literatura

- [1] CASTELLANO, C., *ERS Tandem Data Quality Check for DEM Generation*, Fringe'99
Liège, ESA, 2000
- [2] CENIA, *Portál veřejné správy ČR*, <http://geoportal.cenia.cz/>
- [3] ČAPKOVÁ, I., *Radarová interferometrie: chyby v georeferencování*, ČVUT, 2005
- [4] ČAPKOVÁ, I., *Rozbalení fáze pro účely radarové interferometrie*, ČVUT, 2005
- [5] EURIMAGE, *MultiMission Satellite Data*, <http://www.eurimage.com/>
- [6] EUROPEAN SPACE AGENCY, *Display Earth remote sensing Swath Coverage for Windows*, <http://earth.esa.int/descw/>
- [7] HALOUNOVÁ, L. & PAVELKA, K., *Dálkový průzkum Země*, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005
- [8] HANSSEN, R., *Přednášky předmětu Radar Remote Sensing and Deformation Monitoring*, Delft University of Technology, 2006
- [9] HANSSEN, R., *Radar interferometry*, Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2001
- [10] JET PROPULSION LABORATORY, *Shuttle Radar Topography Mission*,
<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
- [11] KAMPES, B. & HANSSEN, R., *Cookbook – Radar Interferometric Processing with DORIS*, Delft University of Technology, 2006
- [12] KAMPES, B., *DORIS User's Manual and Technical Documentation*, Delft Institute of Earth Observation and Space Systems, Delft University of Technology, 1999

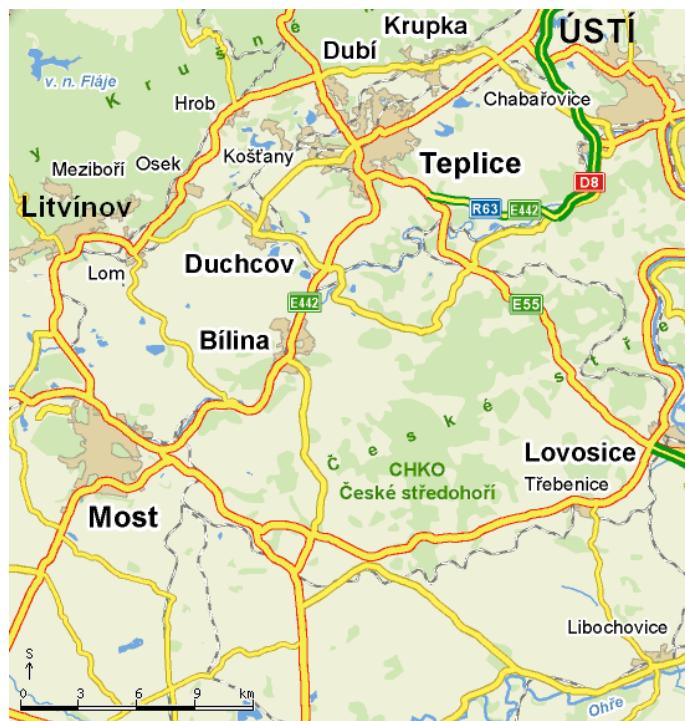
- [13] KAMPES, B., HANSSEN, R. & PERSKI, Z., *Radar Interferometry with Public Domain Tools*, Fringe 2003, Frascati, Italy, 2003
- [14] KAMPES, B. & USAI, S., *Doris: The Delft object-oriented Radar Interferometric software*, ITC 2nd ORS symposium, 1999
- [15] KRÜGER, G. ET AL., *Spaceborne Polarimetric SAR Interferometry: Performance Analysis and Mission*, EURASIP Journal on Applied Signal Processing Concepts, 2005
- [16] KUČERA, L., *Using ERS SAR Interferometry for DEM creation in the Czech Republic*, Fringe'99 Liège, ESA, 2000
- [17] NASA, *Shuttle Radar Topography Mission*, <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/>
- [18] NASA, *SRTM Topography*, SRTM Documentation, 2002
- [19] PORTÁL SEZNAM, *Mapy portálu Seznam*, <http://mapy.seznam.cz/>
- [20] ROSEN, P. A. ET AL., *Synthetic Aperture Radar Interferometry*, Proceedings of the IEEE, 2000
- [21] SCHARROO, R. & VISSER, P., *Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites*, Journal of Geophysical Research, Vol. 103, 1998
- [22] SCHWÄBISCH, M., *Large Area DEM Generation with ERS Tandem Data*, Proceedings of CEOS SAR Workshop, Noordwijk, 1998
- [23] SHOCART, *Turistické mapy 1:50 000*, č. 03 a 08, 2004
- [24] SMALL, D. & NÜESCH, D., *Validation of Height Models from ERS Interferometry*, Fringe'96 Zurich, ESA, 1997
- [25] STANFORD RADAR INTERFEROMETRY RESEARCH GROUP, *SNAPHU: Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping*, http://www-star.stanford.edu/sar_group/snaphu/, 2003
- [26] THE MATHWORKS, *MATLAB - The Language of Technical Computing*, <http://www.mathworks.com/>
- [27] URBAN, P., *Detekce polohových změn zemského povrchu radarovou interferometrií*, studie k disertační práci, ČVUT, 2002

Příloha A

Obrázky



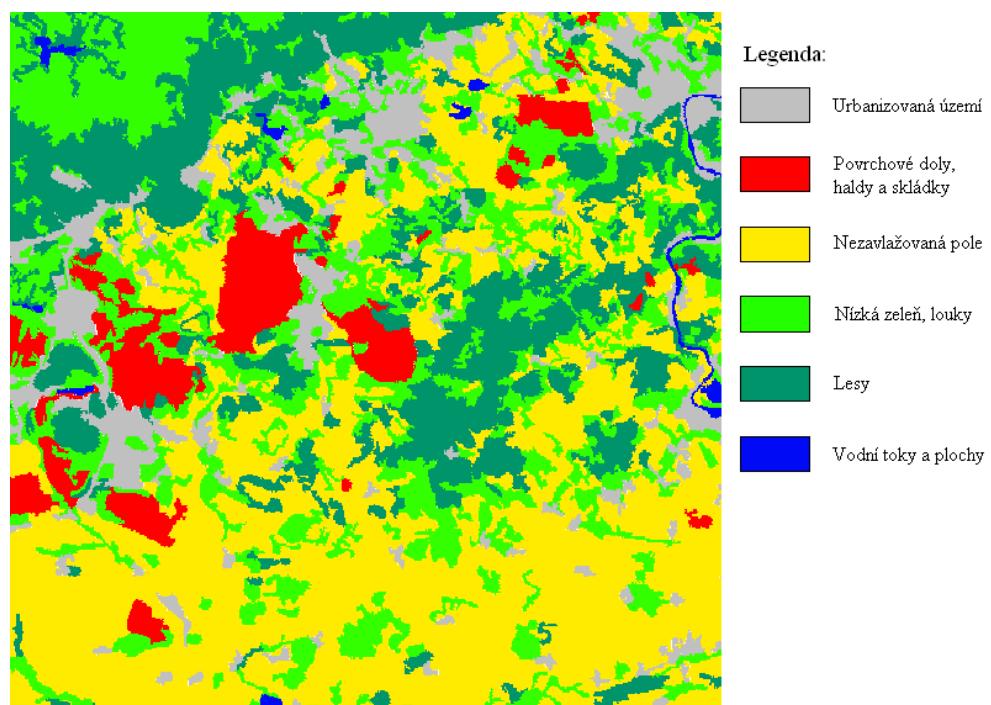
Obrázek A.1: Snímané území (obrázek převzat z programu DESCW [6])



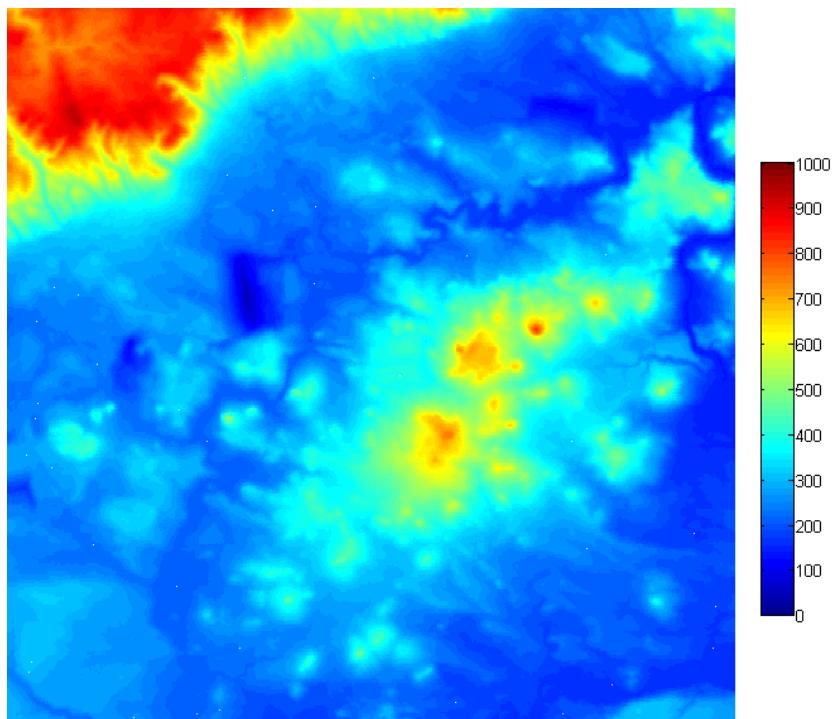
Obrázek A.2: Mapa zájmového území (obrázek převzat z [19])



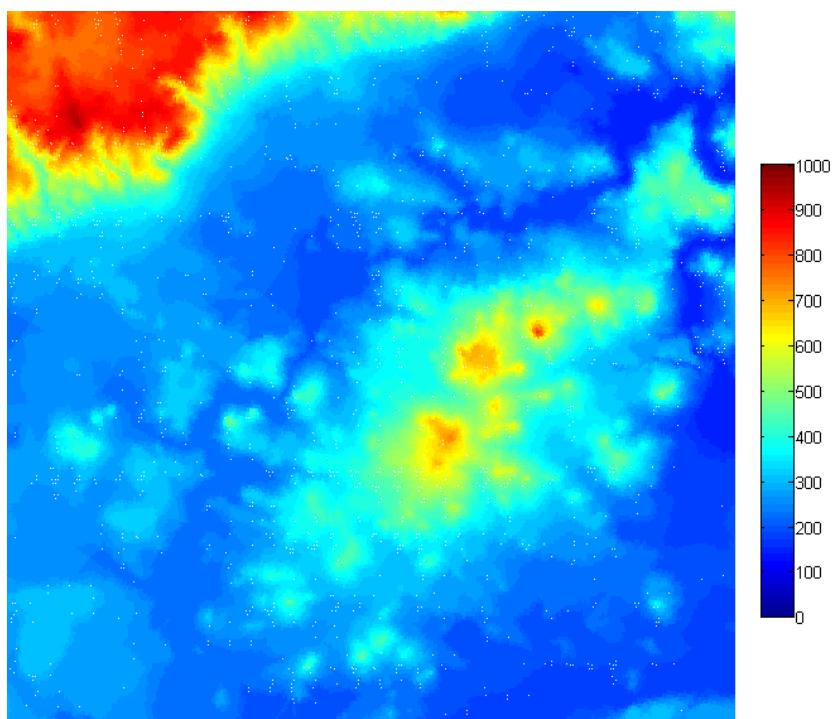
Obrázek A.3: Ortofoto zájmového území (obrázek převzat z [19])



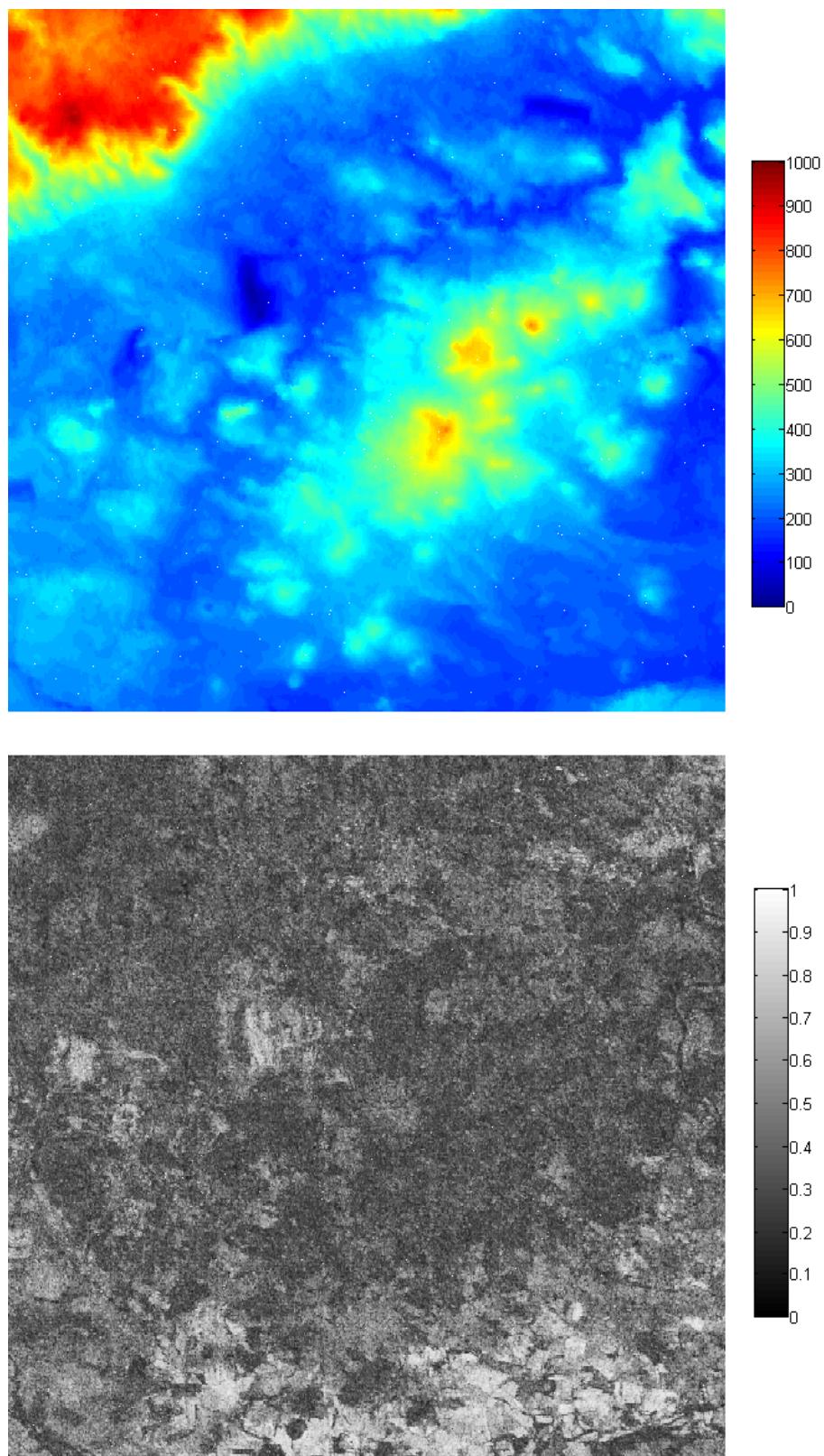
Obrázek A.4: Využití území a stav vegetace podle databáze CORINE



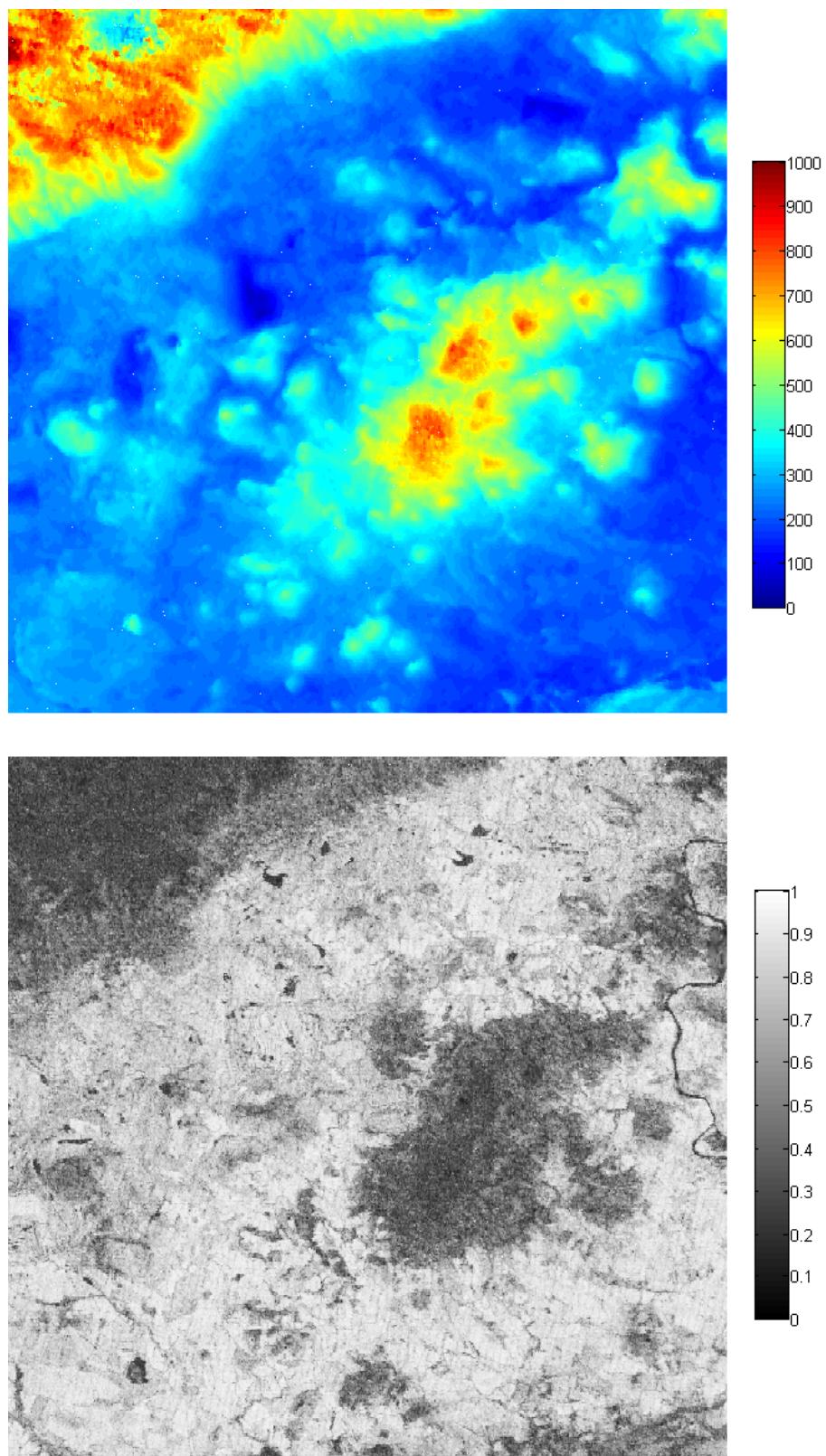
Obrázek A.5: DEM z mise SRTM



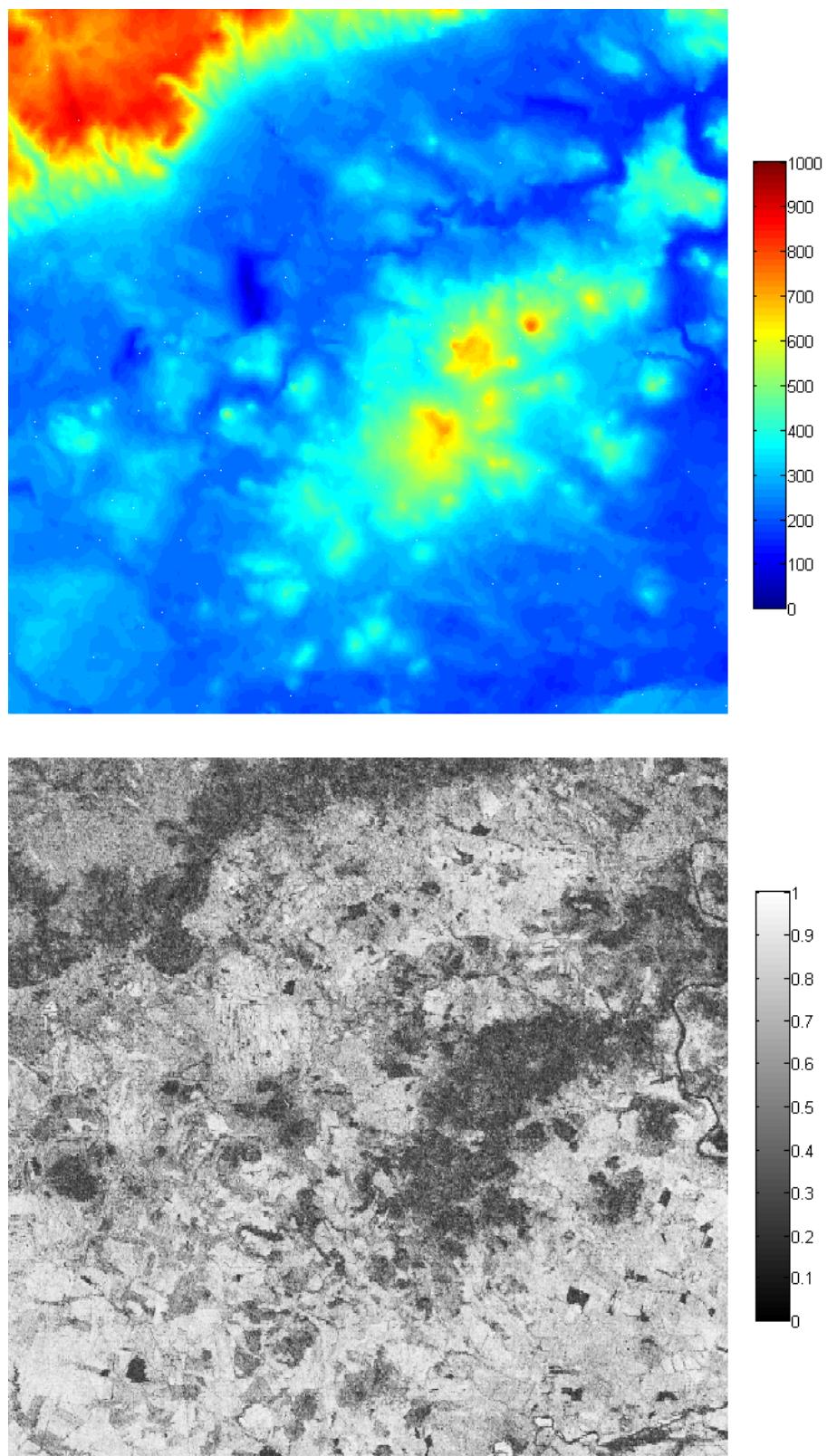
Obrázek A.6: DEM z Digitálního modelu území 1:25 000



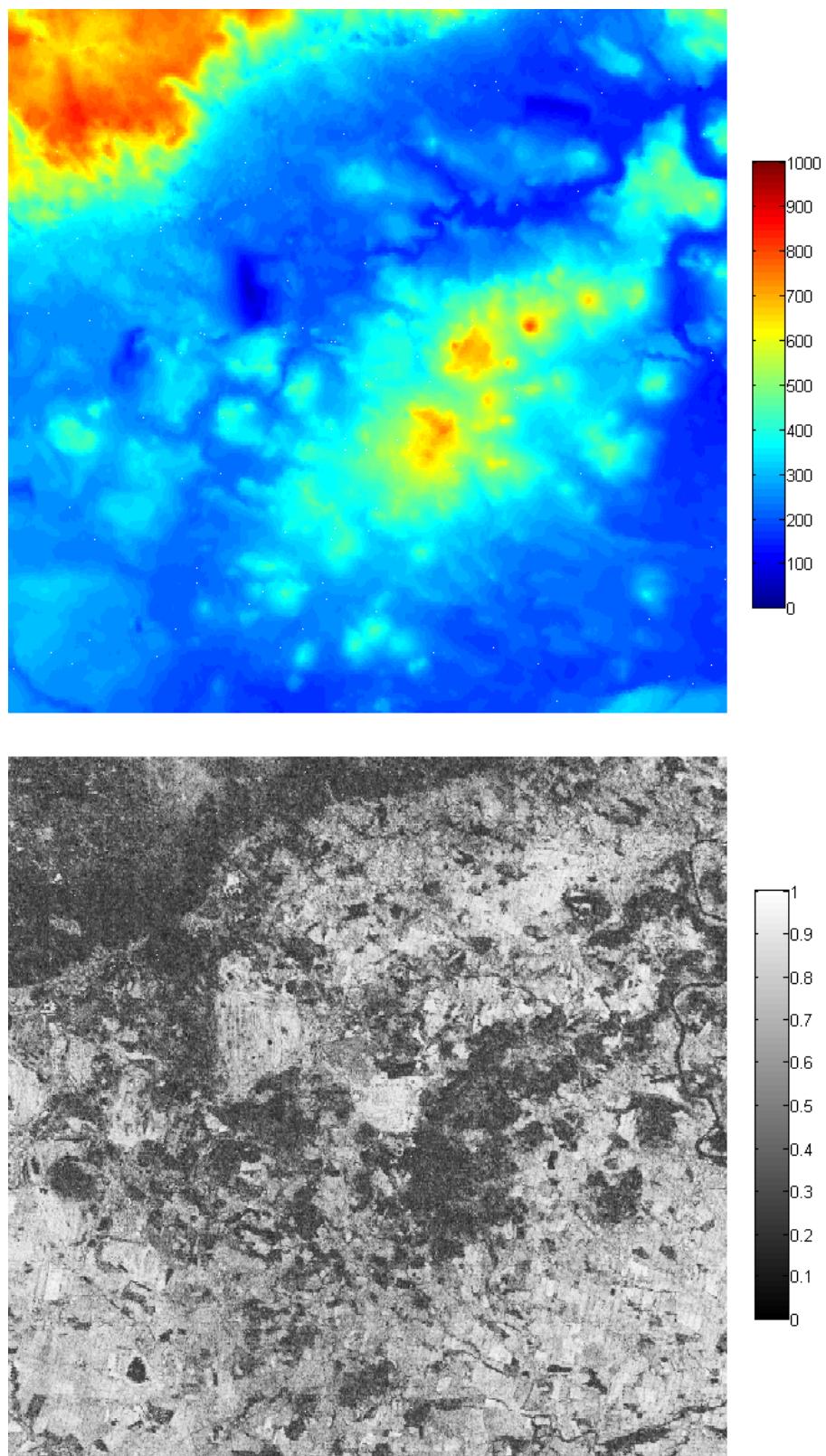
Obrázek A.7: DEM vytvořený z tandem-páru 1, kolmá základna 74 m



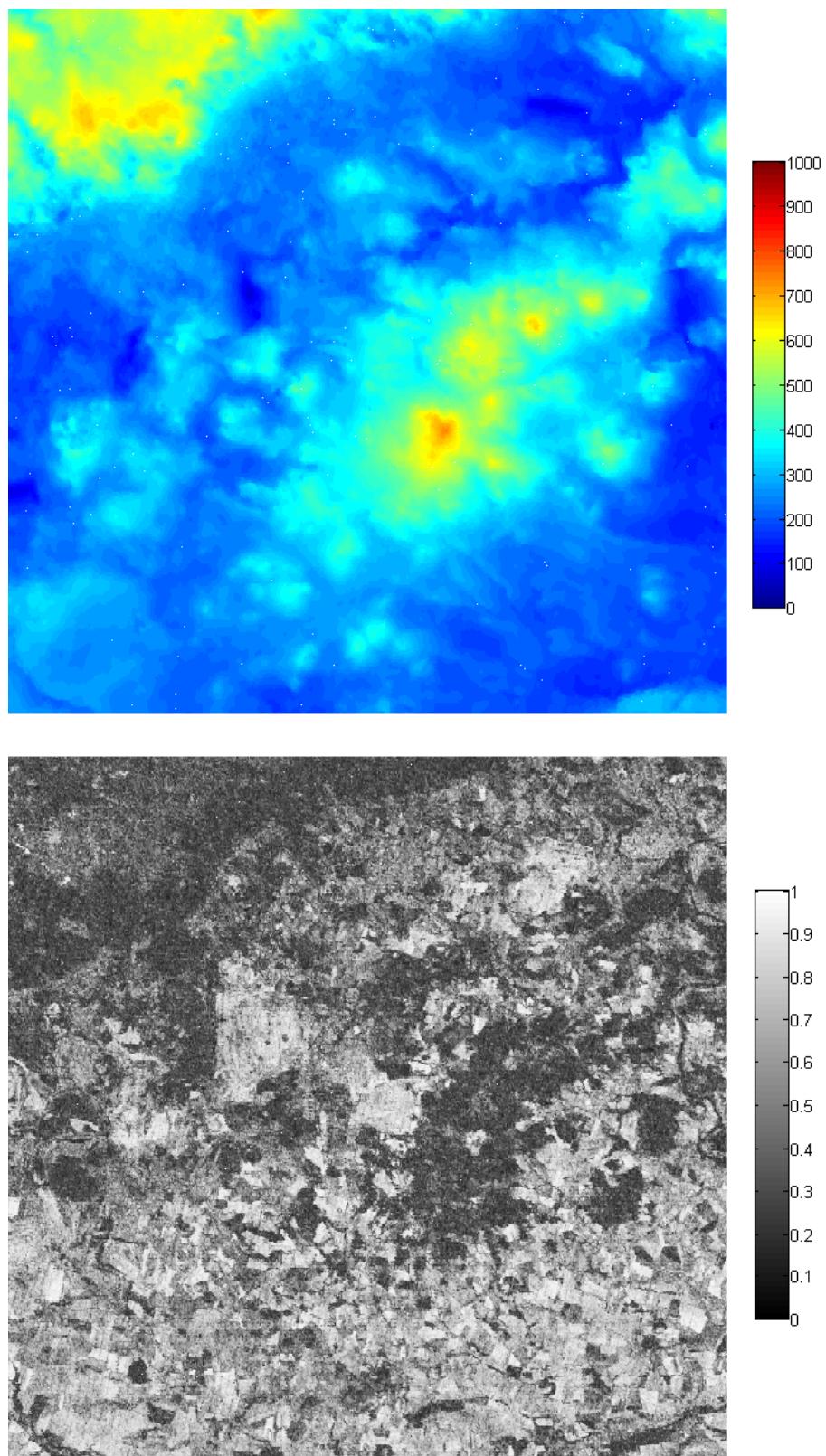
Obrázek A.8: DEM vytvořený z tandem-páru 2, kolmá základna 27 m



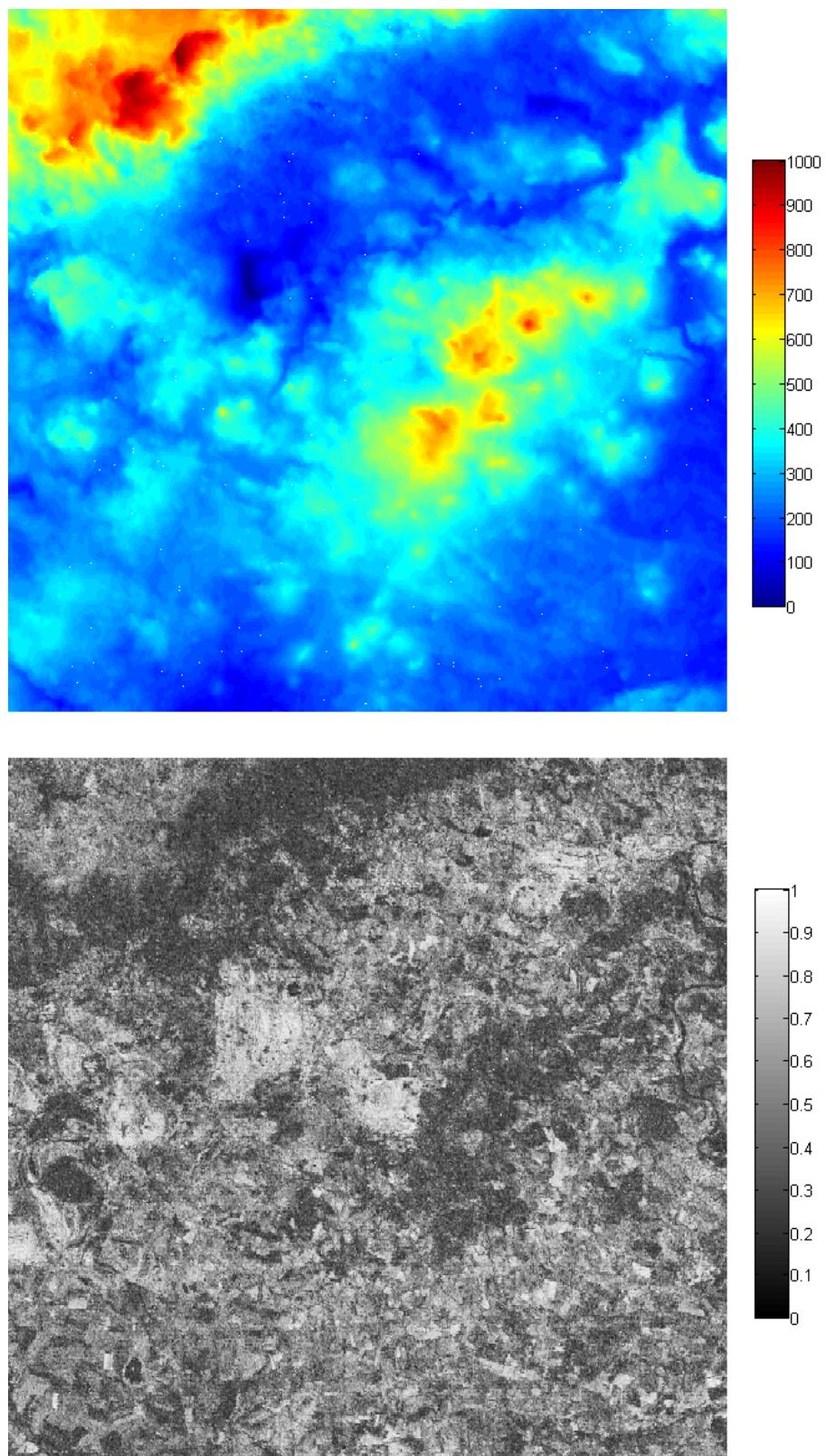
Obrázek A.9: DEM vytvořený z tandem-páru 3, kolmá základna 83 m



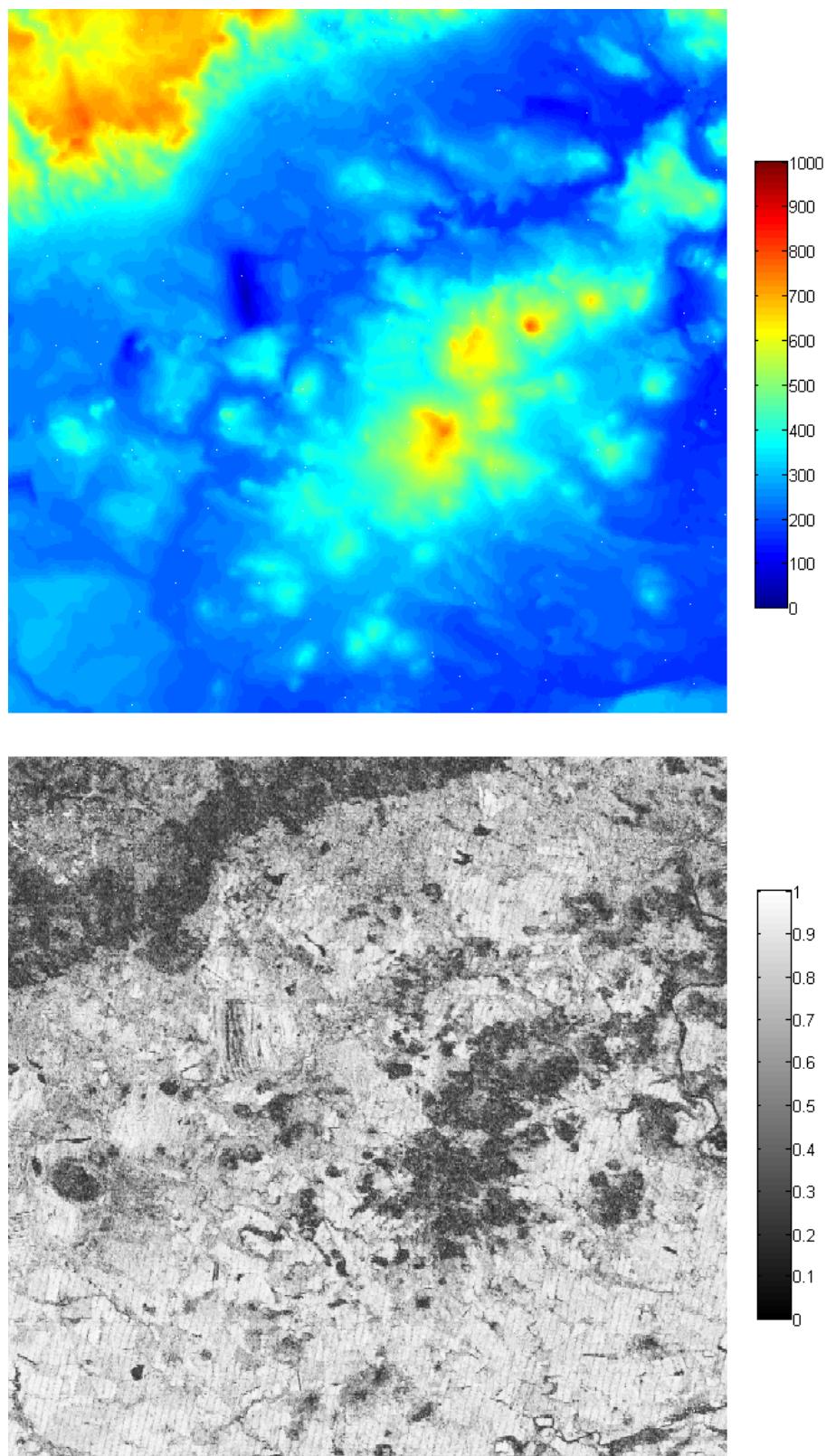
Obrázek A.10: DEM vytvořený z tandem-páru 4, kolmá základna 103 m



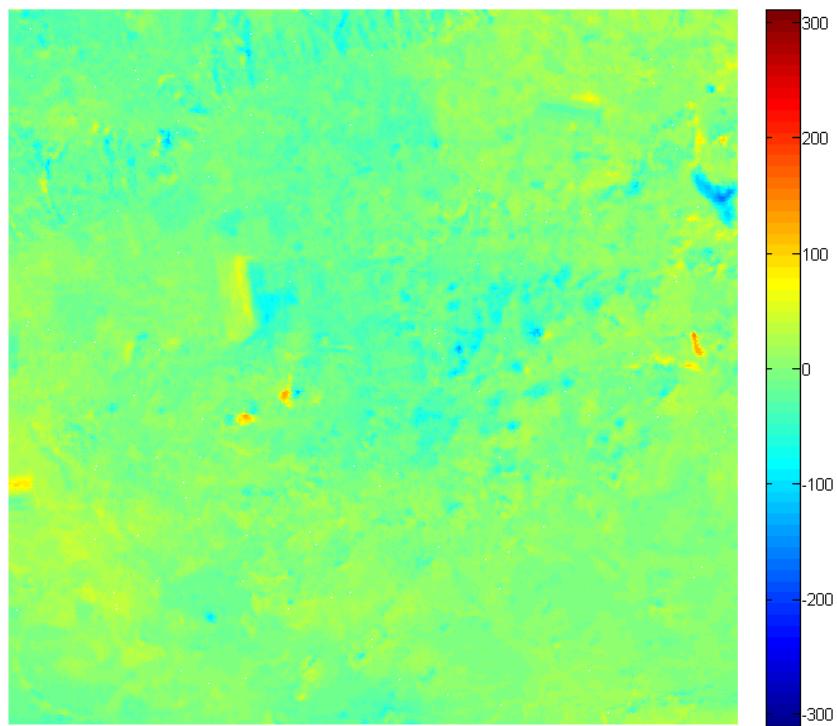
Obrázek A.11: DEM vytvořený z tandem-páru 5, kolmá základna 106 m



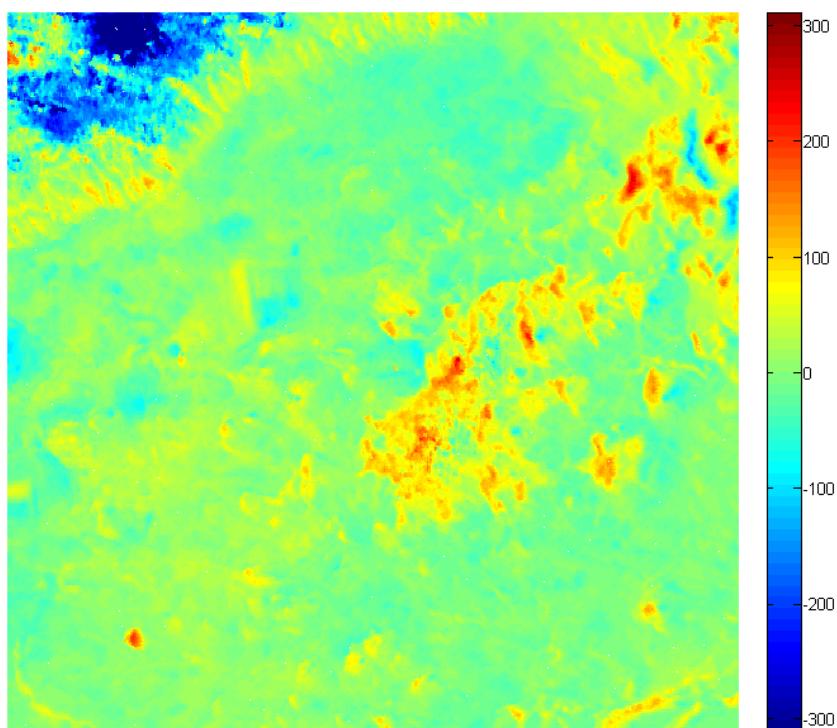
Obrázek A.12: DEM vytvořený z tandem-páru 6, kolmá základna 93 m



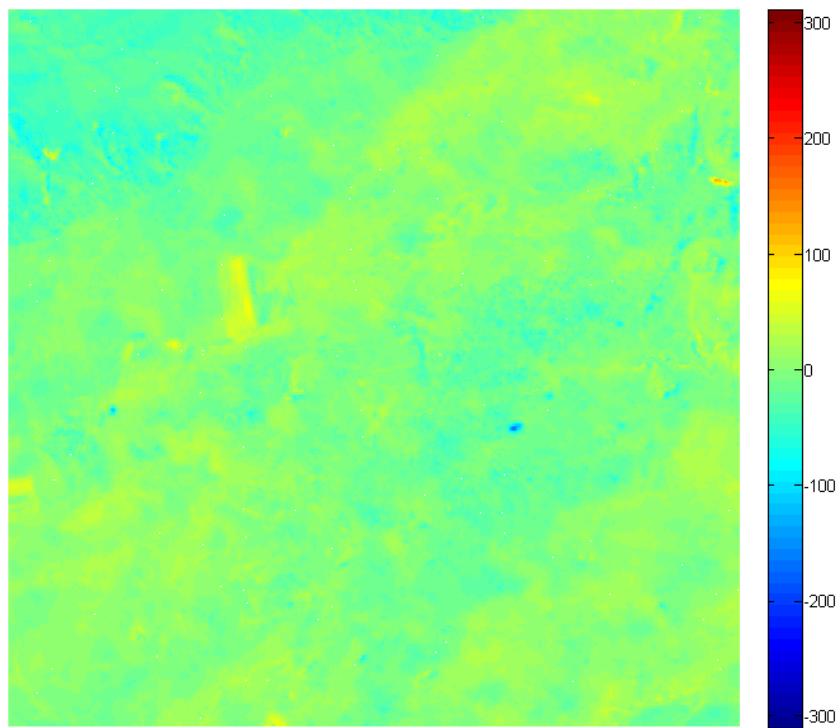
Obrázek A.13: DEM vytvořený z tandem-páru 7, kolmá základna 167 m



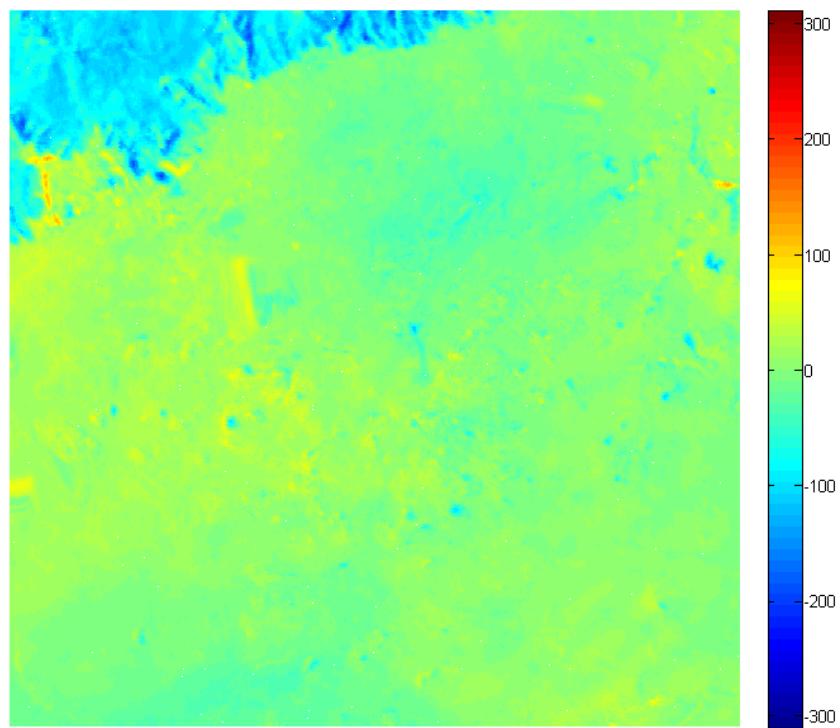
Obrázek A.14: Rozdíl mezi DEM z tandem-páru 1 a DEM ze SRTM



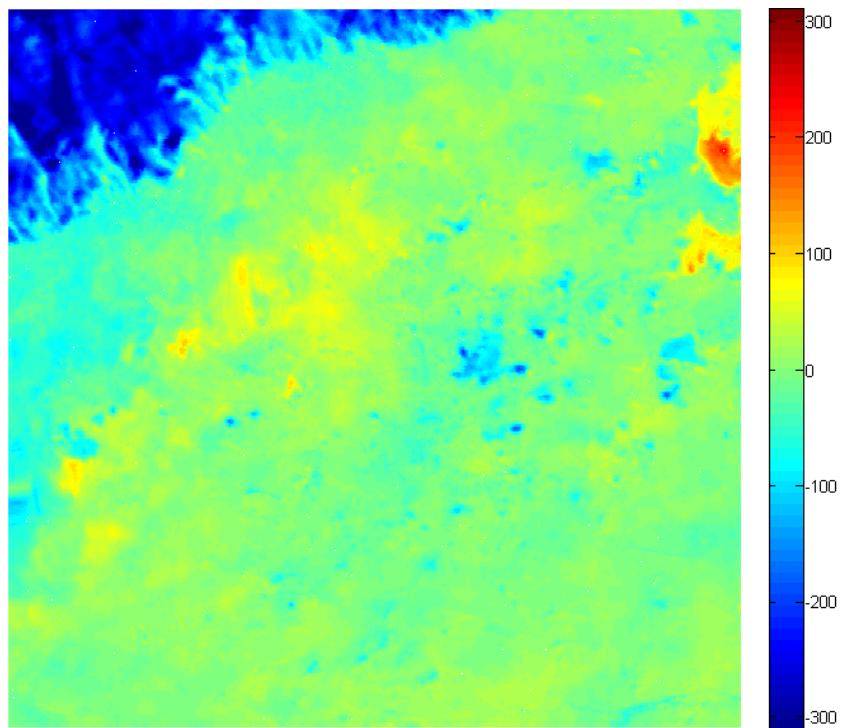
Obrázek A.15: Rozdíl mezi DEM z tandem-páru 2 a DEM ze SRTM



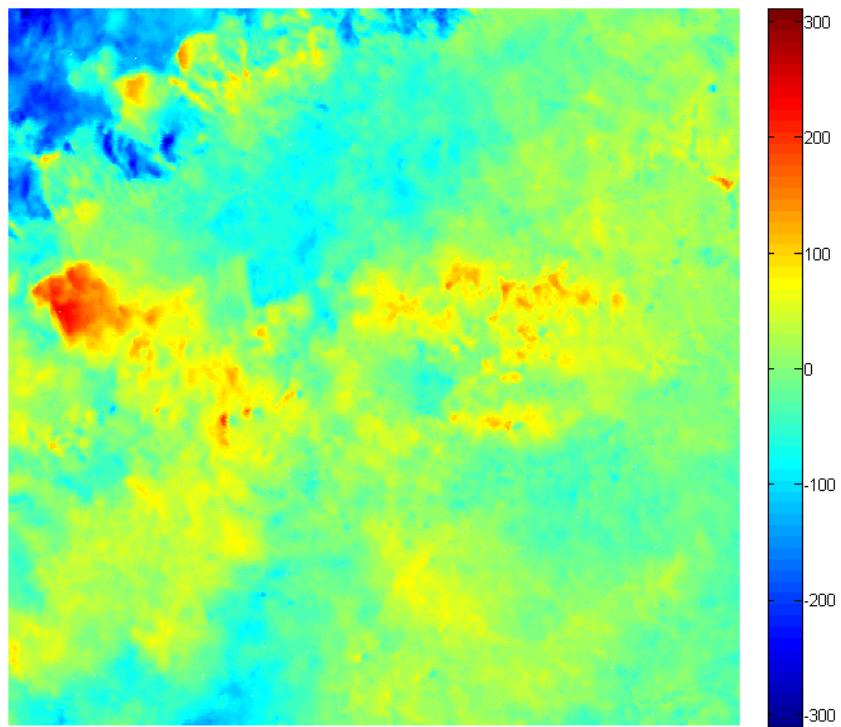
Obrázek A.16: Rozdíl mezi DEM z tandem-páru 3 a DEM ze SRTM



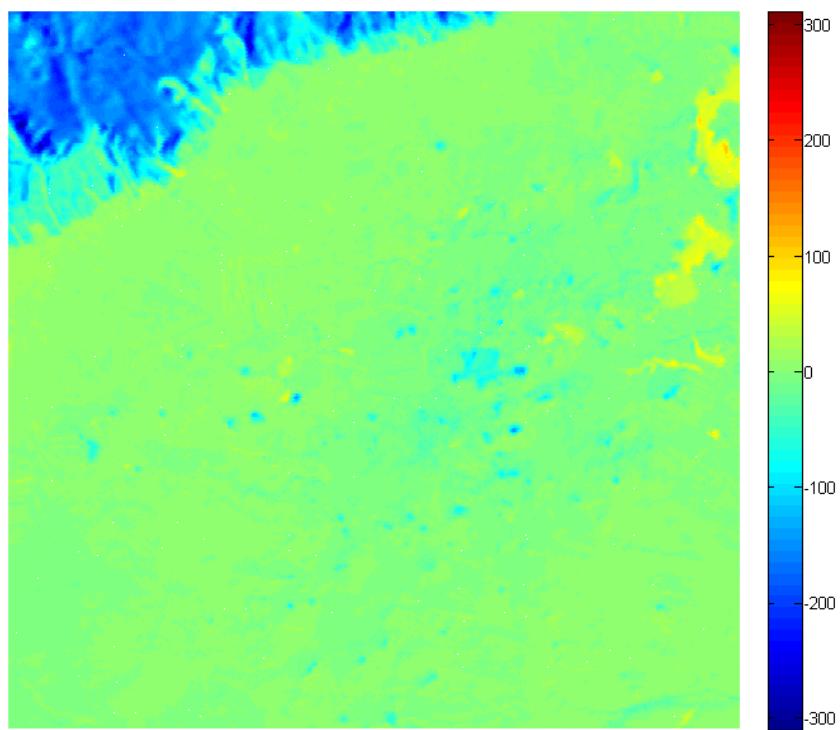
Obrázek A.17: Rozdíl mezi DEM z tandem-páru 4 a DEM ze SRTM



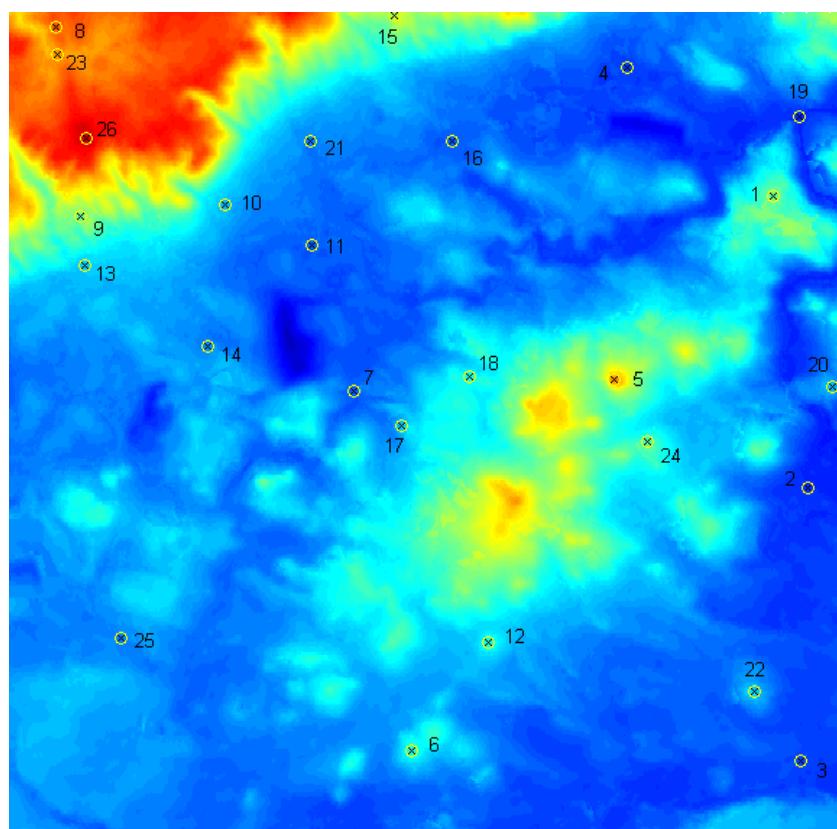
Obrázek A.18: Rozdíl mezi DEM z tandem-páru 5 a DEM ze SRTM



Obrázek A.19: Rozdíl mezi DEM z tandem-páru 6 a DEM ze SRTM



Obrázek A.20: Rozdíl mezi DEM z tandem-páru 7 a DEM ze SRTM



Obrázek A.21: Lokalizace kontrolních bodů z topografické mapy

Příloha B

Tabulky

pokryv	1	2	3	4	5	6	7	průměr
zástavba	0,42	0,13	0,71	0,14	0,66	0,13	0,59	0,15
prům. oblasti	0,48	0,16	0,75	0,11	0,69	0,13	0,66	0,15
komunikace	0,44	0,14	0,73	0,12	0,65	0,14	0,58	0,17
přístavy	0,50	0,16	0,71	0,13	0,59	0,16	0,63	0,17
letiště	0,45	0,13	0,74	0,14	0,65	0,12	0,69	0,10
povrch. doly	0,48	0,15	0,76	0,12	0,74	0,14	0,71	0,16
haldy a skládky	0,40	0,12	0,75	0,14	0,69	0,15	0,65	0,17
staveniště	0,37	0,09	0,73	0,10	0,56	0,13	0,72	0,13
městská zeleň	0,38	0,12	0,70	0,13	0,52	0,15	0,46	0,16
sportoviště	0,39	0,11	0,71	0,18	0,60	0,15	0,57	0,17
nezavl. orná p.	0,46	0,16	0,79	0,14	0,74	0,14	0,65	0,17
vinice	0,33	0,08	0,81	0,08	0,61	0,15	0,48	0,16
sady	0,38	0,12	0,70	0,16	0,64	0,14	0,58	0,16
louky	0,37	0,11	0,54	0,22	0,57	0,17	0,53	0,18
pole	0,38	0,12	0,72	0,16	0,67	0,16	0,60	0,16
přír. vegetace	0,36	0,11	0,66	0,18	0,57	0,16	0,50	0,18
list. lesy	0,33	0,09	0,54	0,17	0,41	0,14	0,36	0,13
jehl. lesy	0,34	0,09	0,39	0,13	0,38	0,11	0,33	0,09
smíš. lesy	0,34	0,09	0,47	0,15	0,38	0,12	0,35	0,12
přír. louky	0,34	0,10	0,70	0,16	0,59	0,15	0,45	0,13
nízký lesní porost	0,37	0,11	0,53	0,23	0,59	0,15	0,46	0,18
vodní toky	0,34	0,12	0,66	0,21	0,38	0,16	0,33	0,12
vodní plochy	0,30	0,08	0,44	0,21	0,45	0,17	0,32	0,12

Tabulka B.1: Závislost koherence na druhu pokryvu (hodnota koherence a směr. odchylka)

PŘÍLOHA B. TABULKY

XIX

Místo	Mapa	DEM 1	DEM 2	DEM 3	DEM 4	DEM 5	DEM 6	DEM 7	SRTM	DMÚ25
Hlava u Ústí n. L.	385	491	510	473	497	464	502	493	500	499
Lovosice	151	154	159	171	159	152	161	156	155	151
Libochovice	166	171	194	186	180	187	148	174	170	175
Chabařovice	175	173	175	193	165	177	159	174	176	178
Milešovka	836	688	744	754	776	634	810	753	798	800
Oblík u Louň	509	419	458	414	420	396	451	419	474	436
Bílina	214	180	213	205	209	245	200	203	201	200
Puklá skála u Flájí	839	775	755	771	706	525	594	637	805	799
Meziboří	512	465	479	478	499	359	480	441	482	476
Osek	307	291	302	296	314	289	291	314	306	304
Duchcov	201	189	217	210	221	223	163	228	221	225
Křížový vrch u Třebenic	449	403	425	401	435	364	461	400	434	399
Litvínov	339	306	317	332	352	262	353	338	329	325
Radčice u Mostu	279	269	255	254	285	254	329	268	269	275
Židovský vrch u Dubí	619	540	613	555	428	365	483	378	598	557
Teplice	228	194	205	246	213	225	182	232	226	225
Trupelník u Bíliny	355	322	362	340	366	360	379	348	347	344
Štrbecký vrch u Bíliny	475	387	448	431	338	410	472	385	461	434
Labe v Ústí n. L.	140	147	184	142	146	203	171	185	132	150
Strážště u Lovosic	362	329	280	302	301	301	315	306	331	307
jezero Barbora u Teplic	262	239	252	244	263	244	247	254	244	251
Hazmburk u Libochovic	418	331	320	324	323	310	338	329	368	349
vodní nádrž Fláje	711	730	736	713	645	448	584	564	739	759
Ostrý u Lovosic	552	427	506	496	460	416	497	471	508	482
Lišnice u Mostu	265	246	252	248	240	251	266	228	225	225
Loučná	959	941	727	893	837	643	764	746	936	934

Tabulka B.2: Porovnání výšek z mapy, DEM, SRTM a DMÚ25 [m]

PŘÍLOHA B. TABULKY

XX

Místo	DEM 1	DEM 2	DEM 3	DEM 4	DEM 5	DEM 6	DEM 7	SRTM	DMÚ25
Hlava u Ústí n. L.	19	0	37	13	46	8	17	10	11
Lovosice	-3	-8	-20	-8	-1	-10	-5	-4	0
Libochovice	-5	-28	-20	-14	-21	18	-8	-4	-9
Chabařovice	2	0	-18	10	-2	16	1	-1	-3
Milešovka	148	92	82	60	202	26	83	38	36
Oblík u Louň	90	51	95	89	113	58	90	35	73
Bělina	34	1	9	5	-31	14	11	13	14
Puklá skála u Flájí	64	84	68	133	314	245	202	34	40
Meziboří	47	33	34	13	153	32	71	30	36
Osek	16	5	11	-7	18	16	-7	1	3
Duchcov	12	-16	-9	-20	-22	38	-27	-20	-24
Křížový vrch u Třebenic	46	24	48	14	85	-12	49	15	50
Litvínov	33	22	7	-13	77	-14	1	10	14
Radčice u Mostu	10	24	25	-6	25	-50	11	10	4
Židovský vrch u Dubí	79	6	64	191	254	136	241	21	62
Teplice	34	23	-18	15	3	46	-4	2	3
Trupelník u Bíliny	33	-7	15	-11	-5	-24	7	8	11
Štrbecký vrch u Bíliny	88	27	44	137	65	3	90	14	41
Labe v Ústí n. L.	-7	-44	-2	-6	-63	-31	-45	8	-10
Strážiště u Lovosic	33	82	60	61	47	56	31	55	
jezero Barbora u Teplic	23	10	18	-1	18	15	8	18	11
Hazmburk u Libochovic	87	98	94	95	108	80	89	50	69
vodní nádrž Fláje	-19	-25	-2	66	263	127	147	-28	-48
Ostrý u Lovosic	125	46	56	92	136	55	81	44	70
Lišnice u Mostu	19	13	17	25	14	-1	37	37	40
Loučná	18	232	66	122	316	195	213	23	25

Tabulka B.3: Rozdíly výšek z mapy, DEM, SRTM a DMÚ25 [m]