ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební, obor Geodézie a kartografie

Katedra mapování a kartografie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vyhodnocení chyb v začátku měření radarových dat pro interferometrii

Červen 2006 Lenka Chuwa

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

Oponent: Ing. Petr Urban, Ph. D.

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracovala samostatně a veškeré podklady, z kterých jsem čerpala, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze 1. června 2006 Lenka Chuwa

Obsah

1 Úvod **9**

2 Cíl diplomové práce, zpracovávaná data, družice a použitý software **11**

2.1 Cíl diplomové práce . . . 11

2.2 Radarová data . . . 12

2.2.1 Obecný popis radarových dat . . . 12

2.2.2 Zpracovávaná data . . . 14

2.3 Družice . . . 15

2.3.1 ERS-1 a ERS-2 . . . 15

2.3.1.1 ESA (Evropská kosmická agentura) . . . 17

2.3.2 ENVISAT . . . 17

2.3.3 RADARSAT . . . 18

2.3.4 JERS . . . 18

2.4 Použitý software . . . 19

2.4.1 DORIS . . . 19

2.4.2 MATKART . . . 19

2.4.3 MATLAB . . . 19

2.4.4 GROMA . . . 19

3 Základní principy radarové interferometrie **20**

3.1 Radar se syntetickou aperturou . . . 20

3.2 Princip vzniku radarového obrazu . . . 21

3.3 SAR interferometrie . . . 22

3.3.1 Diferenční SAR interferometrie . . . 28

3.3.2 Přesnost SAR interferometrie . . . 30

4 Využití SAR interferometrie **32**
4.1 Monitorování deformací . . . 32
4.2 Topografické mapování . . . 33
4.3 Tématické mapování . . . 34
4.4 Mapování atmosférických odchylek . . . 34

5 Teorie oprav časování v začátku měření radarových dat **35**
5.1 Definice interferometrické základny . . . 35
5.2 Typy chyb v radarových datech . . . 37
5.3 Projevy chyb v radarových datech . . . 38
5.4 Teorie oprav časování radarového obrazu . . . 39
5.4.1 Výpočet přibližných posunů ve směru azimutu a range . . . 39
5.4.2 Výpočet oprav časování ve směru azimutu a range . . . 41

6 Teorie georeferencování, Dopplerův centroid **42**
6.1 Teorie georeferencování . . . 42
6.2 Deformace georeferencovaného obrazu . . . 43
6.3 Doppler centroid . . . 47

7 Zpracování interferogramu **50**

8 Zpracování radarových dat **59**
8.1 Oprava časování hlavního radarového obrazu . . . 59
8.1.1 Zpracovávaná data . . . 59
8.1.2 Postup zpracování radarových dat . . . 60
8.2 Oprava časování vedlejšího radarového obrazu . . . 71
8.2.1 Zpracovávaná data . . . 71
8.2.2 Postup zpracování radarových dat . . . 72
8.3 Vyhodnocení velikosti oprav časování . . . 74
8.4 Georeferencování tandem páru . . . 81
8.4.1 Zpracovávaná data . . . 81
8.4.2 Postup zpracování radarových dat . . . 81

9 Závěr **89**

Kapitola 1

Úvod

Laická veřejnost si při vyslovení pojmu dálkový průzkum Země představí obrazové snímky pořízené z vesmíru. Odborníci však vědí, že jsou metody dálkového průzkumu Země, jejichž výsledkem nemusí být obrazový snímek zemského povrchu, ale například radarová obrazová data (dále jako radarový obraz). Jednou z těchto metod je i radarová interferometrie, jejíž užitek je obecně dvojí: měření topografie zemského povrchu resp. tvorba digitálního modelu terénu (dále jako DMT) a sledování deformací zemské kůry (poklesy, sesuvy, postseismické deformace, atd.).

K získání radarových obrazů je používán radar se syntetickou aperturou (dále jako SAR) umístěný na družici. Výhodou měření pomocí SAR oproti pořizování obrazových snímků je průchodnost radarového signálu skrze atmosféru bez ohledu na světlo či oblačnost. Negativně je měření pomocí SAR ovlivněno změnami v atmosféře a chybami v určení orbit družic. Další problémy, které mohou nastat, je zastínění a špatná odrazivost určitých částí snímaného území zemského povrchu.

SAR, jehož vlnová délka je v řádu několika centimetrů, měří nejen intenzitu přijatého signálu (odpovídající odrazivosti místa na zemském povrchu), ale i jeho fázi (odpovídající vzdálenosti satelitu od daného místa na zemském povrchu). Fáze je ovšem měřena pouze v intervalu $(-\pi, \pi)$ odpovídající vzdálenosti $(0, \lambda/2)$ cm, kde pro družice ERS je vlnová délka radaru $\lambda = 5.6$ cm. Z tohoto důvodu neměříme vzdálenost jako takovou, ale jen doměrek vůči celistvému násobku této vlnové délky. Proto je princip této relativně nové geodetické techniky založen na interferenčním jevu, který je zapříčiněn rozdílnou fází dvou radarových obrazů stejného území. Radarové obrazy používané pro interferometrické zpracování mohou být pořízeny v různých polohách družice nebo ze stejné polohy družice, ale v různém čase. Zároveň mohou být pořízeny stejnou družicí resp. stejným SAR, ale i dvěma rozdílnými družicemi resp. dvěma rozdílnými SAR. V druhém případě mohou vlivem rozdílných SAR nastat komplikace.

Metoda interferometrie je používána k určení digitálního modelu terénu, pokud byly radarové obrazy totožného území pořízeny z různých poloh družice. V případě, že mezi okamžiky pořízení radarových obrazů stejného území nastane nezanedbatelný časový rozdíl, je metoda interferometrie využívána k určení modelu deformací povrchu Země snímaného území.

Tato diplomová práce je zaměřena na vyhodnocení chyb v začátku měření radarových obrazů pro interferometrii. Prakticky bylo zpracováno 53 radarových obrazů ze čtyř skupin radarových dat.

Na základě určení posunů mezi vypočteným interferogramem a syntetickým interferogramem vygenerovaným z DMT bylo pro každý hlavní radarový obraz opraveno časování v začátku jeho měření. Opravené časování hlavních radarových obrazů sloužilo jako základ pro opravu časování v začátku měření všech vedlejších radarových obrazů. Výstupem obou kroků je nejen oprava časování v začátku měření pro všechny zpracovávané radaorové obrazy, ale i vyhodnocení velikosti oprav časování v závislosti na použité družici (ERS-1 nebo ERS-2) a době akvizice.

Významná část diplomové práce se soustředí na provedení georeferencování jednoho páru radarových obrazů. Vlivem chyb v radarových datech dochází k deformaci georeferencovaného radarového obrazu vůči skutečnosti. Tuto deformaci lze vyhodnotit pomocí parametrů afinní transformace, která byla provedena v souřadnicovém systému S-JTSK mezi dvěma souřadnicovými soustavami identických bodů. Výstupem georeferencování a následných výpočtů je úvaha o správném výpočtu oprav časování ve směru azimutu a range. Výsledky byly rovněž použity jako důkaz teorie, že byl Dopplerův centroid určen dostatečně přesně.

Kapitola 2

Cíl diplomové práce, zpracovaná data, družice a použitý software

2.1 Cíl diplomové práce

Diplomová práce je složena ze tří na sebe navazujících částí:

- **Oprava časování v začátku měření hlavního radarového obrazu**

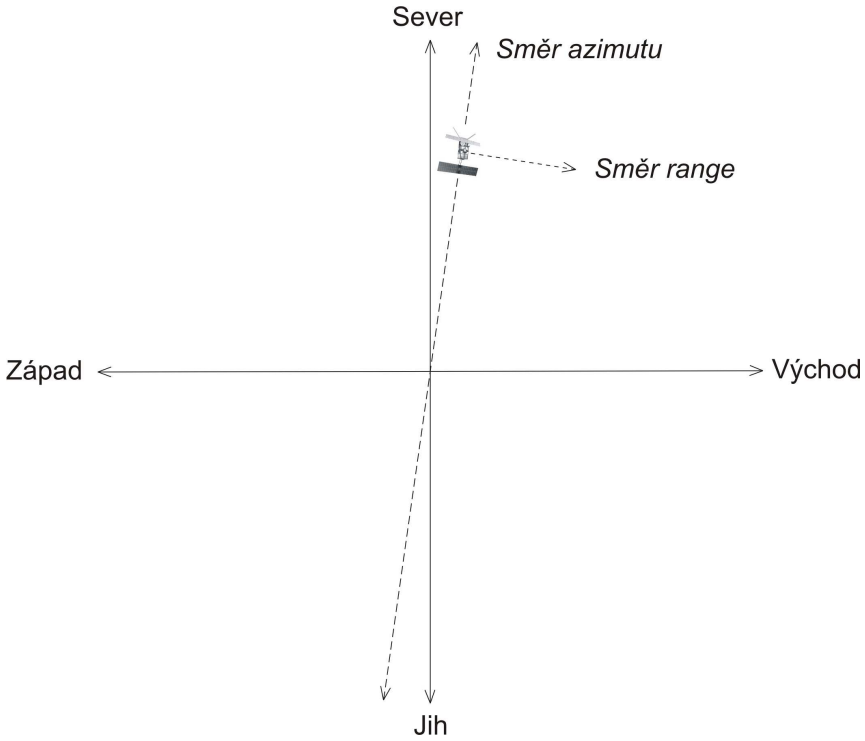
  Na základě vyhodnocení posunu mezi interferogramem a syntetickým interferogramem vygenerovaným z DMT lze určit opravy časování v začátku měření hlavního radarového obrazu a časování opravit. Časování v začátku měření radarových obrazů rozlišujeme jak ve směru azimutu, tak v tzv. příčném směru, který je kolmý na směr letu (dále jako směr range). Situaci zobrazuje obrázek 2.1.

- **Oprava časování v začátku měření vedlejšího radarového obrazu**

  Na základě opraveného časování v začátku měření hlavního radarového obrazu ve směru azimutu a ve směru range je opraveno časování v začátku měření každého vedlejšího radarového obrazu opět ve směru azimutu a range. Následuje vyhodnocení velikosti těchto oprav v závislosti na družici a době akvizice. V rámci jedné skupiny radarových dat jsou všechny výsledky vztaženy k jednomu hlavnímu radarovému obrazu.

- **Georeferencování a vyhodnocení chyb**

  Po provedení georeferencování jednoho tandem páru následuje vyhodnocení parametrů afinní transformace a jejich přesnosti. Cílem tohto kroku je dokázat zavedení správných oprav časování v začátku měření radarového obrazu a dále potvrdit či vyvrátit teorii, že byl Dopplerův centroid určen dostatečně přesně tak, aby se jeho nepřesnost neprojevila ve výpočtu georeferencování.



Obrázek 2.1: Obrázek zobrazuje směr letu družice. Dále je znázorněn směr azimutu a směr range. Tento obrázek byl převzat z [1].

2.2 Radarová data

Dvě následující kapitoly obsahují obecný popis radarových dat a informace o radarových datech použitých pro zpracování této diplomové práce.

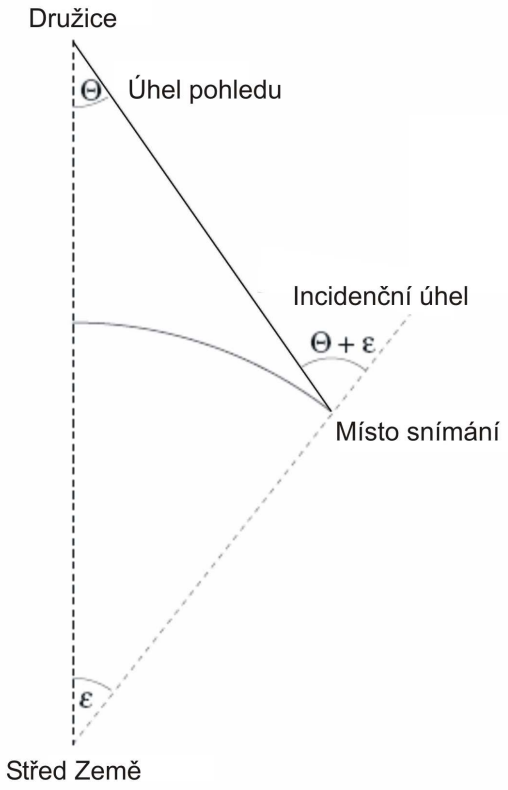
2.2.1 Obecný popis radarových dat

Pro pochopení výběru vhodných radarových dat, která jsou výsledkem měření zemského povrchu radarovými aperturami, je nezbytné znát základní vlastnosti radarových dat.

Optické snímky jsou pořizovány skenery nebo fotografickými kamerami, které měří odražené sluneční záření. Radarové systémy jsou, na rozdíl od fotografických kamer, vybaveny vlastním zdrojem mikrovlnného záření o vlnové délce 1 mm až 1 m. Výhodou použití záření s mnohem nižší frekvencí je prostupnost radarových vln skrze mlhu, oblaka i mírný déšť.

Radarové vlny také pronikají porostem nebo i do půdy, což nám teoreticky dovoluje získat informace i o podpovrchové vrstvě.

Geometrie radarového měření je naznačena na obr. 2.2, kde radarový paprsek nedopadá na zemský povrch kolmo, ale pod tzv. incidenčním úhlem.



Obrázek 2.2: Geometrie snímání SAR.

Data pořízená SAR mají oproti optickým datům větší dynamický rozsah, proto jsou ukládána s radiometrickým rozlišením 16 bitů na rozdíl od 8 bitů či 11 bitů u optických dat.

SAR může vysílat vlnu jak horizontálně (H), tak i vertikálně (V) polarizovanou a přijímat buď horizontální signál, vertikální signál nebo obojí. Přijaté horizontální a vertikální signály od jednoho objektu mají rozdílnou intenzitu. Tento rozdíl lze obecně použít jako pomocnou informaci o některých objektech.

2.2.2 Zpracovávaná data

V roce 2005 objednala katedra mapování a kartografie ČVUT Praha radarová data, která jsou předmětem zpracování této diplomová práce. Dodavatelem radarových dat byla Evropská kosmická agentura (dále jen ESA), která v rámci mise družic ERS-1 a ERS-2 data pořídila. Radarová data byla zakoupena již ve formátu SLC (*Single Look Complex)*, který je potřebný pro provedení interferometrických výpočtů. Zpracovávaná radarová data byla pořízena v průběhu let 1996 až 2004. Přehled všech radarových dat resp. radarových obrazů je součástí tabulky 8.6.

Radarové obrazy rozdělujeme na základě datumů jejich pořízení takto:

- **Páry radarových obrazů s co nejkratší časovou základnou**

  Tato data jsou vhodná pro vytváření digitálního modelu terénu. V praxi je první radarový obraz určitého území na povrchu pořízen např. družicí ERS-1 a po uplynutí 24 hodin je pořízen družicí ERS-2. Takto získaný pár nazýváme tandem. Při našem zpracování bude tandem radarových obrazů hrát velkou roli při vyhodnocení chyby časování hlavního radarového obrazu, a to z důvodu jeho koherence.

- **Páry radarových obrazů s delší časovou základnou**

  Tyto páry dat jsou využívány pro mapování deformací zemské kůry.

2.3 Družice

Kapitola obsahuje přehled družic s radarem se syntetickou aperturou na palubě, které zároveň zaznamenávají polohu družice v okamžiku pořizování radarových dat. V tabulce 2.1 jsou uvedeny parametry několika družic, které splňují výše uvedené podmínky.

Družice	Frekvence [GHz]	Šířka stopy [km]	Úhel pohledu [°]
ERS	5.25, C-band	100	23
ENVISAT	5.331, C-band	100-500	22
RADARSAT	5.3, C-band	20-500	20-59
JERS	1.275, L-band	85	35

Tabulka 2.1: Obsahuje hodnoty frekvence, šířky stopy (šířka snímaného území ve směru letu) a úhlu pohledu (platí pro střed snímaného území). Další parametry družic lze nalézt v literatuře [2].

2.3.1 ERS-1 a ERS 2

Radarové družice vhodné pro interferometrickou metodu výpočtu DMT jsou např. družice ERS-1 a ERS-2 [23]. Tyto družice mají především díky laserové a radarové lokaci (platí jen pro družici ERS-2) přesně známou a kontrolovanou dráhu, což je jedním ze základních předpokladů pro zdárnou aplikaci této metody.

Evropská kosmická agentrura (dále jako ESA) provozovala či provozuje tyto družice:

- **ERS-1**

  ERS-1 měla na palubě SAR pracující v pásmu C. Družice byla vyslána na oběžnou dráhu agenturou ESA v roce 1991. Mise družice byla ukončena v roce 2000.

- **ERS-2**

  ERS-2 je nosičem SAR pracujícím v pásmu C stejně jako družice ERS-1. Tato družice navázala na činnost ERS-1 v roce 1995.

Mise ERS-1 byla původně koncipována především pro vědecké účely. Aplikace v komerční sféře se staly prioritou o čtyři roky od vyslání družice ERS-1 na oběžnou dráhu později, kdy na oběžné dráze přibyla družice ERS-2. Obě družice měly téměř shodné přístrojové vybavení a pohybovaly se ve výšce 782 až 785 kilometrů. Družice ERS-2 do roku 2000 následovala družici ERS-1 s jednodenním zpožděním. Družice byly postaveny v konsorciu s Deutche Aerospace.

SAR je hlavní přístroj na palubě družic ERS, který funguje v modech tvořících:

- Image mode, který získává data bez ohledu na světlo či chod počasí;
- Wave mode, což je instrument pro měření výšky vln a jejich frekvence;
- Wind Scatterometer pro měření směru a rychlosti větru.

Tyto mody tvoří soubor přístrojů nazývaných AMI (*Active Microwave Instrument*). ERS je dále vybaven systémem IDHT (*Instrument Data Handling and Transmission*), který zaručuje přenos dat Image modu v reálném čase. Data přijímají pozemní stanice rozmístěné na Zemi: Kiruna (Švédsko), Fucino (Itálie), Maspalomas (Kanárské ostrovy), Tromso (Norsko), Gatineau a Prince Albert (Kanada).

Mezi další důležité přístroje na palubě družic ERS patří přístroje využívané k určení polohy satelitu:

- Radarový altimetr, který měří výšku satelitu nad terénem;
- Mikrovlnný hloubkoměr měřící obsah vodní páry v atmosféře. Naměřená data jsou použita pro korekce radarového altimetru;
- Systém PRARE (*Precise Range and Range Rate Equipment*) sloužící k určení polohy a rychlosti satelitu. Tento systém u ERS-1 po vyslání na oběžnou dráhu přestal brzy fungovat;
- Koutový odražeč LRR (*Laser Retroreflector*) odráží laserové paprsky přicházející od stanic na Zemi a tím slouží k laserové lokaci. Tento přístroj byl pro družici ERS-1 po dlouhou dobu jediným zdrojem přesných orbit.

2.3.1.1 ESA (Evropská kosmická agentura)

Posláním ESA (*European Space Agency*), dodavatele zpracovávaných dat, je zajištění rozvoje kosmického výzkumu směrem, který přináší užitek obyvatelům Evropy. Sedmnáct členských států se na činnosti ESA podílí jak svými finančními, tak i intelektuálními zdroji. Česká republika není členem, přesto na několika projektech participuje.

Budeme-li konkrétnější, ESA si klade následující cíle: výzkum Země, jejího blízkého okolí, sluneční soustavy a vesmíru, rozvoj technologií a služeb založených na vysílání družic, podpora evropského průmyslu, kooperace s kosmickými organizacemi mimo Evropu. Více informací o ESA včetně kontaktů lze nalézt v [3].

2.3.2 ENVISAT

Družici ENVISAT (*Environmental Satellite*) [24] provozuje ESA a slouží k dálkovému průzkumu Země. Na oběžnou dráhu byla vynesena v březnu roku 2002 raketou Ariane 5G.

Z pohledu SAR interferometrie je nutno vyzdvihnout následující vědecké přístroje umístěné na palubě satelitu:

- ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*) je radiolokátor pracující v pásmu C;

- Radarový altimetr 2, přístroj určující odchylku odraženého signálu ze Země s přesností menší než nanosekunda. Je schopen měřit intenzitu a tvar přijatých radarových pulsů;

- Mikrovlnný radiometr MWR (*Microwave Radiometr*) měřící korekce potřebné pro použití radarového altimetru 2;

- DORIS (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*) je systém pro přesné stanovení polohy družice na dráze. Na palubě satelitu je počítána poloha satelitu v reálném čase s přesností na desítky centimetrů. Získaná data mohou také sloužit k monitorování pohybu ledovců, poklesů a vulkánů. Dále slouží k modelování tíhového pole Země a ionosféry;

- Koutový odražeč LRR (*Laser Retro-reflector*) odráží laserové paprsky přicházející od stanic na Zemi a tím slouží k laserové lokaci;

- Spektrometr GOMOS (*Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars*) slouží ke studiu ozonové vrstvy;

- Zobrazující spektrometr MERIS (*Medium Resolution Imaging Spectrometer*);

- Vysoce rozlišující spektrometr MIPAS (*Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding*) pro stanovení chemického složení atmosféry;

- Zobrazující spektrometr SCIAMACHY (*Scanning Imaging Absorption Spectro Meter for Atmospheric Chartography*).

2.3.3 RADARSAT

RADARSAT-1 [25] je družice se SAR na palubě vyslaná v roce 1995 na oběžnou dráhu soukromou kanadskou společností Radarsat International (RSI) především pro komerční účely. Její vývoj a stávající provoz je zajišťován Kanadskou kosmickou agenturou (CSA). Cílem mise je studium polárních oblastí, námořní navigace, identifikace přírodních zdrojů, management zemědělských a vodních zdrojů a monitorování environmentálních změn. Radarsat se pohybuje po polární kruhové dráze ve výšce 800 km. SAR pracuje na vlnové délce 5,6 cm s horizontální polarizací.

2.3.4 JERS

Satelit JERS-1 (*Japanese Earth Resources Satelite-1*) [26] byl vyslán japonskou agenturou NASDA (*National Aeronautics and Space Development Agency*) na oběžnou dráhu v roce 1992, kde byl využíván o čtyři roky déle než byl původní dvouletý záměr. Satelit nesl dva observační přístroje: SAR a optické senzory. Optické senzory sbíraly informace v rámci osmi spekter světla a SAR operoval v pásmu L. JERS-1 jako satelit dálkového průzkumu Země sloužil k výzkumu v odvětvích zemědělství, lesnictví, rybářství, dále k ochraně přírodních zdrojů, monitorování pobřeží, atd. V současné době operuje satelit JERS-2.

2.4 Použitý software

Při výběru softwaru pro interferometrické zpracování rozhodla jeho dostupnost. Katedra mapování a kartografie ČVUT Praha měla k dispozici software DORIS, který je na rozdíl např. od softwaru EarthView™, pro vědecké a studijní účely poskytnut zdarma a umožňuje interferometrické zpracování radarových obrazů.

2.4.1 DORIS

DORIS (*Delft Object-oriented Radar Interferometric Software*) je nekomerční software vyvíjený v institutu DEOS (*Delft Institute of Earth Observation and Space Systems*) při univerzitě v Delftu (*Delft University of Technology*) v Holandsku. Platformou je HP-Unix případně i další platformy. Software má modulární strukturu, je programovaný v programovacím jazyku C++. Lze ho využít jen pro data ve formátu SLC. Manuál softwaru DORIS je uveden na [4].

2.4.2 MATKART

MATKART [5] je program pro souřadnicové transformace a výpočty v kladech listů mapových děl. Byl vyvinut Prof. Ing. Bohuslavem Veverkou, DrSc. z katedry mapování a kartografie ČVUT Praha.

2.4.3 MATLAB

MATLAB [6] je integrované prostředí pro vědeckotechnické výpočty, modelování, návrhy algoritmů, simulace, analýzu a prezentaci dat, měření a zpracování signálů, návrhy řídicích a komunikačních systémů. Nejsilnější vlastností software MATLAB je práce s datovými poli, které není potřeba dimenzovat. To umožňuje řešit mnoho technických problémů s použitím formulací pomocí vektorů a matic.

2.4.4 GROMA

Program GROMA [22] je pro geodetické výpočty, grafiku a vedení seznamu souřadnic.

Kapitola 3

Základní principy radarové interferometrie

Radarová interferometrie je metodou pro tvorbu DMT a případné sledování jeho změn. Kapitola nejprve vysvětluje pojem radar se syntetickou aperturou, objasňuje vznik radarového obrazu, dále vysvětluje princip SAR interferometrie včetně ukázky čtyř způsobů tvorby diferenčního interferogramu. Na závěr pojednává o přesnosti určení DMT a přesnosti výpočtu deformací metodou diferenční interferometrie.

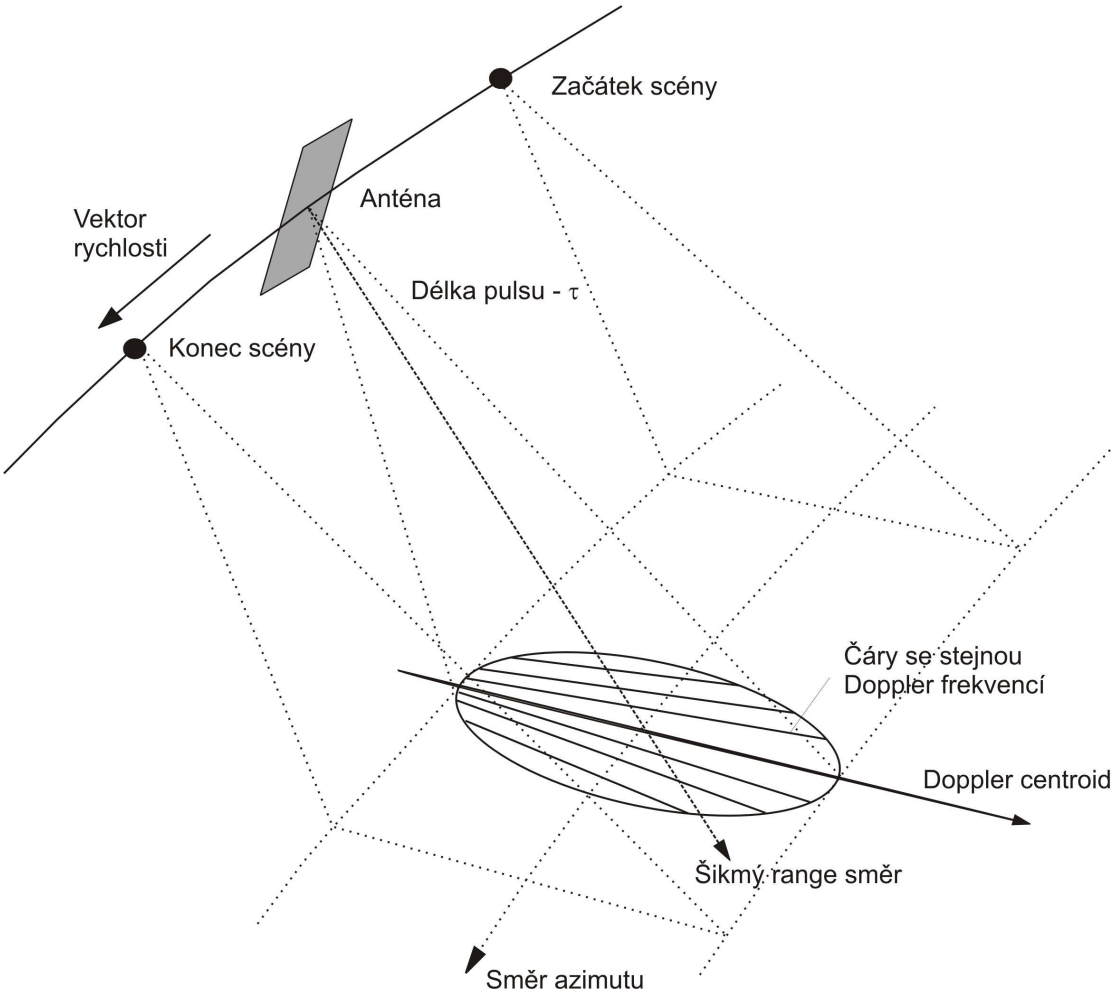
3.1 Radar se syntetickou aperturou

SAR umístěný např. na družici ERS se skládá z plošné antény (10 x 1 m), generátoru impulsů, vysílače a dalších subsystémů.

Na rozdíl od svých předchůdců je tento radar schopen měřit nejen intenzitu přijatého signálu, ale i jeho fázi. Toto je umožněno podmínkou koherence radaru, která umožňuje zaznamenání fáze vysílaného pulsu, s kterou bude srovnána fáze vracejícího se impulsu. Každý pixel radarového obrazu tak obsahuje dvě informační složky: složku amplitudovou a složku fázovou. Amplitudová složka v sobě zahrnuje informaci o intenzitě odraženého záření a popisuje zejména odrazivé vlastnosti povrchu. Fázová složka v sobě zahrnuje informaci o fázi resp. hodnotu fázového doměrku odraženého mikrovlnného záření. Hodnota fázového doměrku se stává nepostradatelnou informací pro výpočet DMT interferometrickou metodou.

3.2 Princip vzniku radarového obrazu

Obrázek 3.1 zobrazuje geometrii SAR při pořizování radarových dat. Družice ERS na své palubě nese radar s plošnou anténou nasměrovanou kolmo na směr letu a zároveň natočenou do strany vzhledem k vertikálnímu směru. Pro SAR umístěném na ERS platí, že je anténa natočena doprava od nadiru. Mezitím, co se satelit pohybuje rychlostí v v nadmořské výšce H_{sat}, radar zaznamenává informace o povrchu Země pomocí vysílání a přijímání elektromagnetických pulsů. Mezi důležité parametry pulsů, které jsou nosiči signálu patří délka pulsu τ, šířka pásma B_B a frekvence vysílaných pulsů *PRF (Pulse Repetition Frequency)*. V průběhu aktivity radaru je povrch Země snímán kontinuálně.



Obrázek 3.1: Geometrie SAR při pořizování radarových dat.
Obrázek byl převzat z [7] a upraven.

Radarový obraz snímaného území se začíná vytvářet od okamžiku, kdy se k radaru vrátí první od povrchu odražené pulsy. Doba, která uplyne než nastane tento okamžik, závisí na vzdálenosti povrchu od družice resp. antény radaru a v malé míře na nerovnosti povrchu.

Podstatou SAR systému je skutečnost, že změny rychlosti např. letadla způsobují tzv. Dopplerův posun, a to v určitých frekvencích v rámci jednoho pulsu. Tento posun může být využit a objekty tak mohou být rozlišeny na základě fázového posunu. Tento proces je nazýván SAR zpracování a umožňuje tvorbu radarových obrazů s lepším rozlišením, než umožňuje reálná apertura.

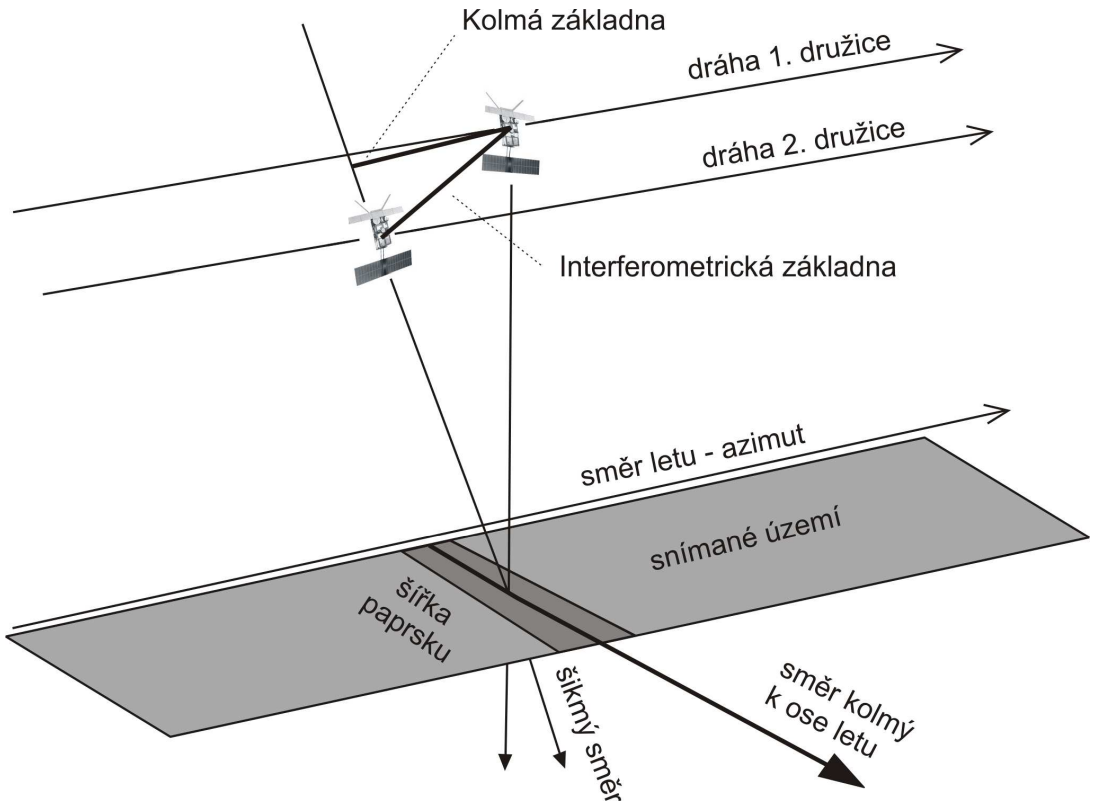
S cílem získat radarová data je využíváno mnoho různých algoritmů a software, což obecně nazýváme SAR processing, o kterém pojednává práce [8].

3.3 SAR interferometrie

Principem SAR interferometrie je porovnání fázové složky odraženého záření mezi odpovídajícími si obrazovými body hlavního a vedlejšího radarového obrazu. Samozřejmě za předpokladu, že hlavní radarový obraz a vedlejší radarový obraz snímají stejné území. Získáním této informace pro každý obrazový bod lze vypočítat relativní výškové členění zobrazovaného území.

Porovnáme-li fázové složky mezi odpovídajícími si obrazovými body stejného hlavního obrazu s dalším vedlejším radarovým obrazem, který byl pořízen po uplynutí určitého časového období, vypočteme případné prostorové změny, které v průběhu tohoto časového období mohly nastat. Tento krok se nazývá diferenční SAR interferometrie (viz. kap 3.3.1).

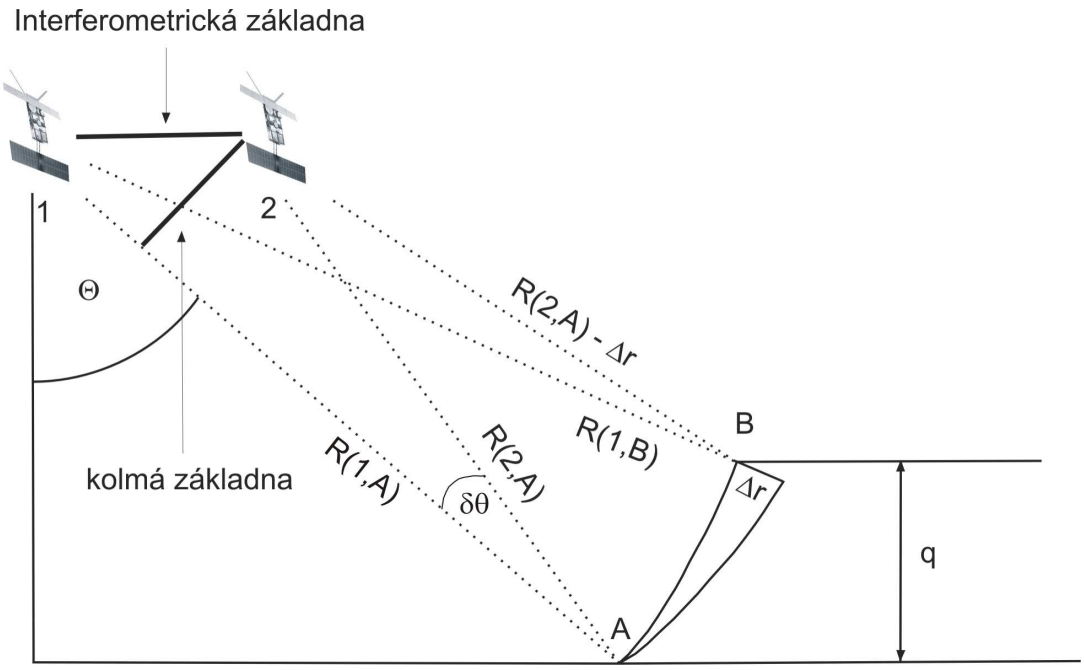
Vzdálenost mezi družicemi v rovině kolmé ke směru dráhy družice nazýváme interferometrickou základnou. Promítneme-li ji kolmo ke směru vysílání mikrovlnného záření, získáme tzv. kolmou základnu. Geometrii SAR interferometrie zobrazuje obr. 3.2.



Obrázek 3.2: Geometrie SAR interferometrie.
Obrázek byl převzat z [1].

Vynásobením (komplexně sdružené násobení) prvního radarového obrazu druhým vznikne tzv. SAR interferogram. Fáze každého pixelu v interferogramu je rozdílem fází odpovídajících si pixelů z prvního a druhého radarového obrazu (dále jako interferometrická fáze). Amplituda každého pixelu v interferogramu představuje hodnotu amplitudy pixelu z prvního snímku vynásobenou amplitudou odpovídajícího pixelu druhého snímku.

Na základě určení interferometrické fáze lze měřit relativní výškové členění terénu daného území. Za předpokladu, že je každý pixel radarového obrazu představován pouze jedním dominantním odražečem, který se v čase nemění, bude interferometrická fáze $\Delta\varphi$ závislá na rozdílu vzdáleností mezi odražečem a oběma radary a dále na rozdílu atmosferických zpoždění signálu. Přechodem z jednoho pixelu na druhý vzniká změna tohoto rozdílu Δr, která závisí na několika geometrických parametrech a bude na základě literatury [9] níže odvozena. Podmínkou odvození je krátká interferometrická základna. Vztahy naznačuje obrázek 3.3.



Obrázek 3.3: Geometrické znázornění výpočtu interferometrické fáze a její změny. Obrázek byl převzat z [9].

Veličiny zobrazené na obrázku 3.3 jsou:

Δr změna rozdílu vzdáleností mezi odražečem a oběma radarovými anténami,

R vzdálenost mezi radarovou anténou a odražečem v šikmém směru,

Θ úhel pohledu,

$\delta\theta$ změna incidenčního úhlu,

$B_{\perp}$ velikost kolmé základny,

q změna výšky sousedního odražeče.

Každý pixel radarového obrazu obsahuje vedle informace o amplitudě odraženého záření i informaci o fázi φ tohoto záření, pro níž dle [9] existuje jednoduchý vztah:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} R_{tam-zpet} = \frac{4\pi}{\lambda} R, \tag{3.1}$$

kde: λ vlnová délka SAR systému.

Potom je hodnota interferometrické fáze v bodě A resp. v bodě B rovna:

$$\varphi_A = \frac{4\pi}{\lambda}\left[R(2,A) - R(1,A)\right],\ \varphi_B = \frac{4\pi}{\lambda}\left[R(2,A) - \Delta r - R(1,B)\right]. \tag{3.2}$$

Body A a B mají na radarovém obrazu pořízeném družicí č. 1 shodnou šikmou vzdálenost. Změna interferometrické fáze mezi body A a B má pak hodnotu:

$$\Delta\varphi = \delta\varphi_A - \delta\varphi_B = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta r\,. \tag{3.3}$$

Pro SAR interferometrii platí, že změna incidenčního úhlu $\delta\theta$ je malá a vzdálenost mezi radarovou anténou a odražečem v šikmém směru R je velká. Za těchto předpokladů pak hledanou změnu rozdílu vzdáleností mezi odražečem a oběma radarovými anténami Δr vyjádříme takto:

$$\Delta r = \delta\theta\frac{q}{\sin(\theta)} = \frac{B_\perp}{R}\frac{q}{\sin(\theta)}. \tag{3.4}$$

Tvar výrazu pro změnu interferometrické fáze zahrnující rozdílné šikmé vzdálenosti obrazových pixelů obsahuje dvě složky. První složkou je fáze úměrná výškovému rozdílu q vztaženému k referenční ploše:

$$\Delta\varphi_1 = \frac{4\pi}{\lambda}\frac{B_\perp}{R}\frac{q}{\sin(\theta)}. \tag{3.5}$$

Druhá druhá složka je fáze úměrná posunu s dvou odražečů v šikmém směru (viz. obr. 3.4):

$$\Delta\varphi_2 = \frac{4\pi}{\lambda}\frac{B_\perp}{R}\frac{s}{\tan(\theta)}. \tag{3.6}$$

Výsledný tvar změny interferometrické fáze:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda}\frac{B_\perp q}{R\sin(\theta)} + \frac{4\pi}{\lambda}\frac{B_\perp s}{R\tan(\theta)}, \tag{3.7}$$

kde: λ vlnová délka SAR systému,

$B_{\perp}$ velikost kolmé základny,

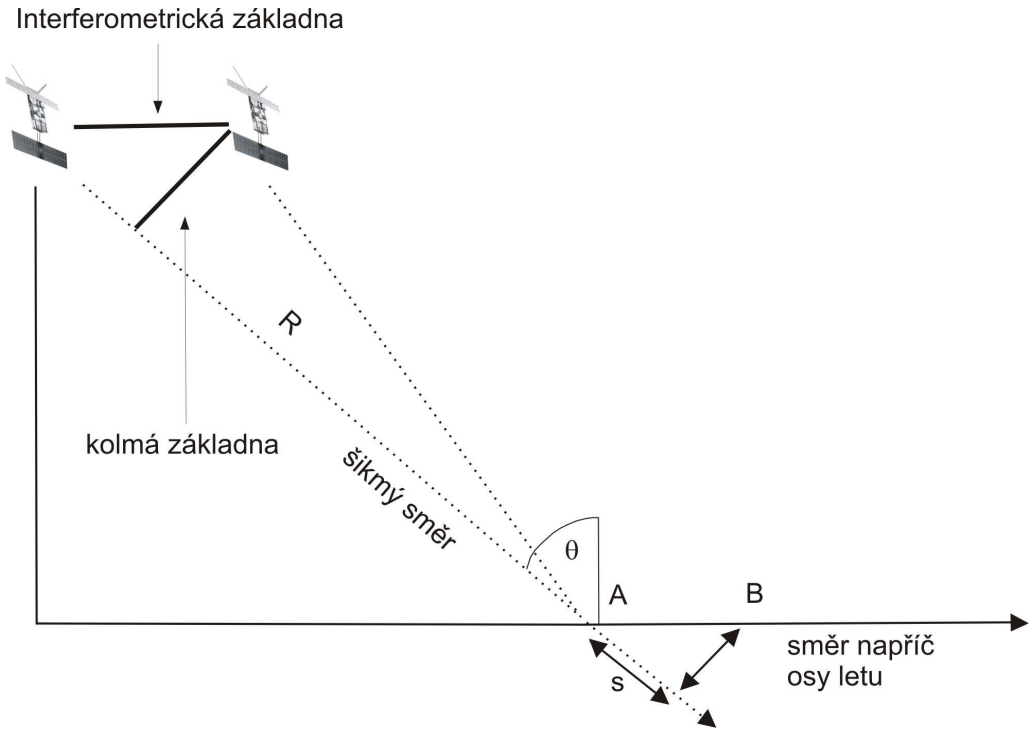
q změna výšky sousedního odražeče,

s změna šikmé vzdálenost sousedního odražeče,

θ incidenční úhel,

R vzdálenost mezi radarovou anténou a odražečem v šikmém směru.

Z přesných orbitálních parametrů drah družic známe velikost kolmé základny. Proto může být druhý člen výrazu pro výpočet změny interferometrické fáze odečten. Tímto bylo dle práce [9] provedeno tzv. interferometrické vyrovnání, po kterém jsou hodnoty interferometrické fáze v interferogramu, pomineme-li posuny terénu a vnější rušivé vlivy, závislé pouze na výškovém členění terénu. Cílem vyrovnání je, aby body o shodné nadmořské výšce, ale rozdílné šikmé vzdálenosti od radarové antény, měly shodné hodnoty interferometrické fáze v interferogramu. Na základě hodot interferometrické fáze lze vypočítat relativní výškové členění terénu daného území.

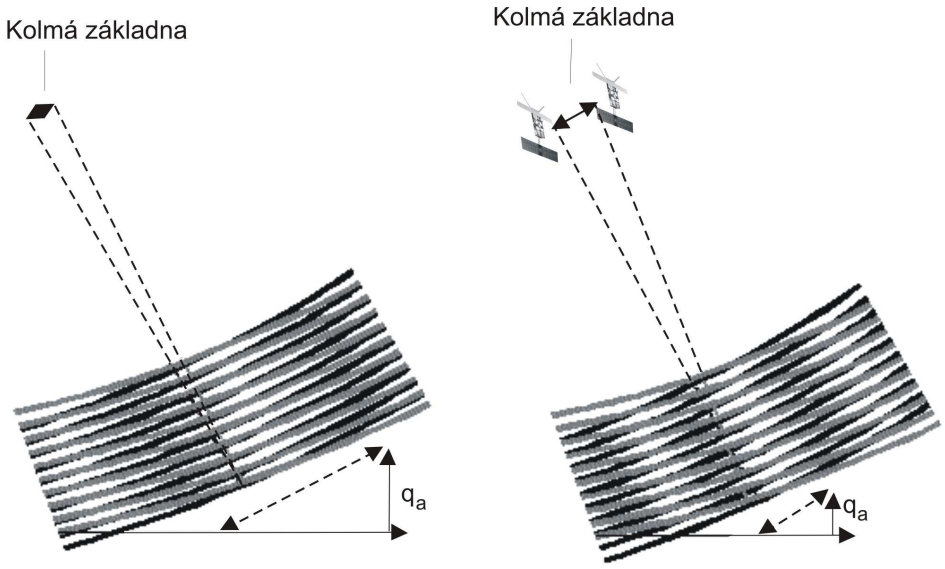


Obrázek 3.4: Vliv změny šikmé vzdálenosti na změnu interferometrické fáze.

Interferogram se skládá z tzv. proužků, které jsou graficky rozlišeny tmavou a světlou barvou. Výškový rozdíl mezi dvěma proužky q_a lze vypočítat z parametrů interferogramu dle [9] takto:

$$q_a = \frac{\lambda R \sin(\theta)}{2B_\perp}. \tag{3.8}$$

Výškový rozdíl je přímo úměrný velikosti kolmé základny (viz obr. 3.5) a po interferometrickém vyrovnání generuje změnu interferometrické fáze o velikosti 2π.



Obrázek 3.5: Vliv kolmé základny na výškový rozdíl mezi dvěma proužky q_a.

V případě družic ERS, kde je λ = 5,6 cm, θ = 23° a R = 850 km, zapíšeme výraz (3.8) takto:

$$q_a = \frac{9300}{B_\perp}[m]. \tag{3.9}$$

Platí, že při použití kolmé základny o velikosti např. 150 m odpovídá změna interferometrické fáze o 2π změně 62 m ve výšce.

Obecně lze konstatovat, že čím větší je kolmá základna, tím přesnější je výškové měření. Velikost kolmé základny je však omezena na určitou hodnotu, po jejíž překročení nastane dekorelace radarových signálů a tím je ztracena interferometrická informace.

3.3.1 Diferenční SAR interferometrie

Při tvrobě DMT se předpokládá, že mezi pořízením hlavního a vedlejšího radarového obrazu nedošlo k polohovým změnám terénu sledovaného území. Nastanou-li relativní změny některých bodových odražečů zemského povrchu vůči ostatním, pak je dle [9] výraz změny interferometrické fáze nutno opravit o složku:

$$\Delta\varphi_d = \frac{4\pi}{\lambda} d \,, \tag{3.10}$$

kde d posun odražeče promítnutý do šikmého směru.

Po vyrovnání interferogramu bude výraz pro výpočet změny interferometrické fáze obsahovat jak složku odpovídající výšce, tak složku $\Delta\varphi_d$:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_\perp q}{R\sin(\theta)} + \frac{4\pi}{\lambda} d \,. \tag{3.11}$$

Diferenční interferogram vzniká odečtením prvního členu výrazu (3.11) v případě, že je DMT daného území znám. Pomocí diferenčního interferogramu lze měřit pohyb terénu daného území.

Citlivost SAR interferometrie na polohové změny terénu je mnohonásobně větší než citlivost na výškové změny. Platí, že polohová změna odražeče v šikmém směru o velikosti 2,8 cm způsobí změnu interferometrické fáze o hodnotě 2π. Tu samou změnu fáze by v případě kolmé základny např. o velikosti 150 m způsobil výškový rozdíl 62 m.

Literatura [9] uvádí čtyři způsoby tvorby diferenčního interferogramu s pomocí:

- **interferometrického páru dvou radarových obrazů, velikost kolmé základny se blíží nule**

  Změna interferometrické fáze v interferogramu je ovlivněna téměř výhradně polohovými změnami terénu.

- **interferometrického páru, velikost kolmé základny je různá od nuly**

  Změna interferometrické fáze obsahuje jak složku spojenou s polohovými změnami, tak relativní výškovou složku. Postup tvorby diferenčního interferogramu vyžaduje nejprve přepočítání původního zobrazení DMT (získaného jinou metodou) do šikmé SAR projekce. V takto vzniklém DMT je za použití kolmé základny stejné velikosti, jakou má i původní interferometrický pár, nutno převést výšky na interferometrické proužky. Vzniká tzv. syntetický interferogram, který se odečte od původního interferogramu získaného z dvojice radarových obrazů.

- **tří radarových obrazů, za předpokladu, že mezi dvěma z nich nedošlo k polohovým změnám terénu**

  K jednomu zvolenému hlavnímu radarovému obrazu jsou zbývající dva radarové obrazy koregistrovány a vytvořeny dva nezávislé interferogramy. Pro první interferogram se volí radarové obrazy tak, aby časový odstup mezi jejich pořízením byl co nejmenší a kolmá základna byla střední až velká. Pro druhý interferometrický pár se volí větší časový rozestup a co nejkratší kolmá základna.

  V tomto případě se provede rozbalení fáze prvního interferogramu a dále změna měřítka takto rozbaleného interferogramu, a to podle poměru první a druhé kolmé základny. Následuje zpětné sbalení fáze a odečtení tohoto interferogramu od druhého. Fáze interferogramů mohou být přímo převedeny do stejného měřítka a odečteny mezi sebou. Vzhledem k obtížnosti provedení rozbalení fáze je doporučeno analyzovat dostupné snímky ještě před zpracováním, a to z výše uvedeného hlediska o poměru mezi první a druhou kolmou základnou.

- **dvou interferometrických párů radarových obrazů (celkem čtyř radarových obrazů), u kterých mezi dvěma z nich nedošlo k polohovým změnám**

  Tento způsob využívá dvou hlavních radarových obrazů, kdy ke každému z nich přísluší jeden vedlejší radarový obraz. Jejich zpracování je totožné se zpracováním tří radarových obrazů s tím rozdílem, že je nutno jeden interferogram tzv. převzorkovat, aby z hlediska pixelů přesně odpovídal druhému interferogramu.

3.3.2 Přesnost SAR interferometrie

Přesnost DMT závisí především na vzdálenosti mezi místy pořízení dvou radarových snímků, tedy na velikosti kolmé základny. Přesnost výpočtu deformací metodou diferenční interferometrie je určena pouze vlnovou délkou emitovaného mikrovlnného záření.

- **Přesnost DMT**

  V případě radarových obrazů pořízených družicemi ERS zjednodušeně říci, že jeden proužek v interferogramu představuje změnu výšky terénu Δh:

$$\Delta h = \frac{9300}{B_{\perp}}, \tag{3.12}$$

  kde $B_{\perp}$ velikost kolmé základny.

  Vzorec (3.12) předpokládá konstantní úhel pohledu 23°, výšku dráhy družice nad terénem 780 km a vlnovou délku záření 5,6 cm. Výplývá z něj, že čím menší bude kolmá základna, tím větší výškový rozdíl bude interferometrický proužek představovat.

  Směrodatná odchylka interferometrické fáze závisí na koherenci mezi radarovými snímky, ze kterých příslušný interferogram vznikl a dle [9] je:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{1}{\sqrt{2N}} \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\lambda}, \tag{3.13}$$

  kde γ hodnota koherence vypočtená ze vzorku N obrazových bodů podle vzorce:

$$\gamma = \frac{\left| \sum_{i=1}^{N} \left(P_{1,i} P_{2,i} \right) \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} P_{1,i}^2 \sum_{i=1}^{N} P_{2,i}^2}}, \tag{3.14}$$

  kde P_i komplexní hodnota vybraného pixelu.

Na základě těchto výpočtů lze vytvořit tzv. koherenční mapu, která pomáhá vytvořit představu o přesnosti vytvářeného DMT. Je-li interferometrická fáze pouhý šum, pak je hodnota koherence 0. Naopak, není-li fázový šum, je hodnota koherence 1. Ze vzorce (3.14) vyplývá, že rozmezí hodnot koherence je od 0 do 1.

Obecně platí, že čím nižší jsou hodnoty v koherenční mapě, tím větší bude směrodatná odchylka interferometrické fáze a tím větší bude i směrodatná odchylka výšek počítaného DMT:

$$\sigma_h = \sigma_\varphi \frac{R\lambda \sin(\theta)}{4\pi B}. \qquad (3.15)$$

Ze vzorce (3.15) vyplývá, že čím větší bude kolmá základna, tím menší výškový rozdíl bude představován jedním cyklem změny interferometrické fáze a tudíž i rozptyl této fáze bude představovat menší směrodatnou odchylku v určení výšky.

Metodou SAR interferometrie při zpracování radarových obrazů z družic ERS je dosahováno přesnosti DMT, definové směrodatnou odchylkou, v řádech několika metrů (rozmezí 5 až 10 m). Předpokladem je velikost kolmé základny 300 až 400 m. Směrodatná odchylka interferometrické fáze se v případě družic ERS v místech s minimální použitelnou koherencí (0.3 – 0.4) pohybuje okolo hodnoty $\pi/2$, což odpovídá ¼ proužku v interferogramu.

- **Přesnost výpočtu deformace metodou diferenční interferometrie**

  Jeden interferometrický proužek představuje změnu polohy odrazového bodu ve směru šíření mikrovlnného záření o vzdálenost, která se rovná polovině vlnové délky tohoto záření. Pro družice ERS je tato hodnota vždy 2,8 cm. Diferenční interferometrie nabízí teoreticky možnost měřit změny DMT s přesností cca 7 mm, a to na základě úvahy, že se směrodatná odchylka interferometrické fáze pohybuje v případě družic ERS opět na úrovni ¼ interferometrického proužku. Předpokladem k dosažení této přesnosti je dostatečná koherence obrazů a nezatížení radarových dat vlivem atmosféry a jinými rušivými vlivy.

Kapitola 4

Využití SAR interferometrie

Aplikace SAR interferometrie lze v současné době rozdělit do čtyř základních skupin využití: monitorování deformací, topografické mapování, tématické mapování a identifikace atmosférických zpoždění.

4.1 Monitorování deformací

Monitorování deformací s použitím SAR interferometrie je specifické pro níže uvedené typy deformací:

- **Poklesy a vyvýšeniny způsobené poddolováním**

  Tato problematika se týká mnoha míst na Zemi, kde je těžena ropa, plyn, voda, sůl a další přírodní zdroje. Např. i výstavba tunelu může způsobit poklesy, které zapříčiní změny infrastruktury na povrchu.

  Možnost použití SAR interferometrie pro identifikování poklesů záleží na mnoha faktorech. Výsledný interferogram je v tomto smyslu ovlivněn sklonem poklesů, dekorelací zapříčiněnou využitím zobrazovaného území či typem vegetace a také velikostí hodnot atmosférických odchylek. Tvorba časově souvislých map deformací má svá podstatná omezení, která jsou způsobena nemožností časově kontinuálního pořizování radarových obrazů. Přesto je dlouhodobě pozorováno, že mapy deformací osídlených a určitých přírodních a antropogenních oblastí lze i pro dlouhý časový interval považovat za časově spojité. Podrobnější vysvětlení obsahuje studie [10].

  Identifikace poklesu také záleží na plošné rozsáhlosti změn, které v daném území nastaly. Poklesy lze tudíž správně identifikovat vzhledem k okolí, ve kterém ke změnám v nedošlo.

- **Deformace způsobené seizmickými otřesy**

  SAR interferometrie je vhodnou metodou pro výzkum zemětřesení a tektonických poruch. Srovnáním s jinými aplikacemi dosahuje nejlepších výsledků v rámci přesnosti a rozlišení. Archivovaná data pořízená radary umístěnými na družicích slouží k monitorování seizmických poruch, a to ať už ve fázi před, při nebo po vzniku poruchy. Praktické využití SAR pro tento účel lze nalézt ve studii [11].

  Kombinace radarových dat s GPS (*Global Positioning System*) pozorováním je velice užitečným nástrojem k získání analýz vzniklých zemětřesením. Příkladem je studie [12]. Seizmickými poruchami se zabývá i práce [13].

- **Deformace vulkanického původu**

  Obdobně jako u deformací způsobenými seizmickými otřesy lze SAR intreferometrii použít ve všech třech fázích před, při a po erupci sopky. Deformacím vulkanického původu se věnuje studie [14].

- **Pohyb ledovců a ledových ker**

  SAR interferometrie umožňuje i sledování pohybu ledovců a ledových ker, a to v řádu metrů. Touto problematikou se zabývá např. článek [15].

4.2 Topografické mapování

Tvorba DMT je v současnosti standardní geodetickou aplikací, která je využívána jak k vědeckým, tak i komerčním účelům. Zpracovávány jsou především tzv. tandem páry radarových dat, které byly pořízeny v rámci misí satelitů ERS-1 a ERS-2. Vzhledem k rozsáhlému pokrytí dat pořízených z těchto satelitů vznikají digitální modely rozlehlých území až modely terénu v měřítku kontinentů. DMT jsou využívány pro telekomunikace, hydrologické mapování, předpovědi záplav, kartografii a geofyziku.

Při použití interferometrie pro tvorbu DMT mohou nastat tyto problémy: efekt překrytí, zhuštění, stín, deformace radarového obrazu, dekorelace a vliv atmosférických změn. Dva poslední zmíněné problémy lze ovlivnit volbou délky časové základny.

4.3 Tématické mapování

Změny parametrů odrazivosti zemského povrchu mezi dvěma radarovými obrazy mohou zapříčinit změny v koherenci nebo-li stupni podobnosti dvou radarových obrazů použitých jako pár pro tvorbu interferogramu. Zůstanou-li parametry odrazivosti nezměněny, stupeň koherence je vyšší. Problematickou částí procesu získání tématické mapy je od sebe oddělit různé zdroje dekorelace.

4.4 Mapování atmosférických odchylek

Principem mapování atmosférických odchylek je jev, při kterém změna atmosférických podmínek ovlivňuje rychlost signálu vysílaného radarem, čímž je naměřen jiný fázový doměrek. Tento jev je při mapování deformací, tématickém mapování a topografickém mapování obecně považován za problém. Zároveň je však zdrojem informací potřebných pro meteorologii a studium dynamiky atmosféry. Toto platí za předpokladu, že topografii sledovaného území známe a zároveň mezi pořízením prvního a druhého radarového obrazu nedošlo k deformacím.

Kapitola 5

Teorie oprav časování v začátku měření radarových dat

Po přehledu typů chyb v radarových datech (chyby v poloze družice, chyby časování přijatého signálu) a projevů těchto chyb při zpracování radarových dat kapitola objasňuje terorii oprav časování radarového obrazu ve směru azimutu a range.

Nejprve si však pro pochopení dalších podkapitol definujeme interferometrickou základnu.

5.1 Definice interferometrické základny

Definice základny vychází z konfigurace SAR, kterou naznačuje obrázek 5.1. Základnu definujeme jako spojnici poloh dvou družic v takových časech, aby byla vždy kolmá na směr rychlosti hlavní družice. Ideální konfigurace je v případě, že je dráha vedlejší družice rovnoběžná s drahou hlavní družice. Různá znázornění základny obsahuje obr. 5.2. Teorie definice základny byla čerpána z [4].

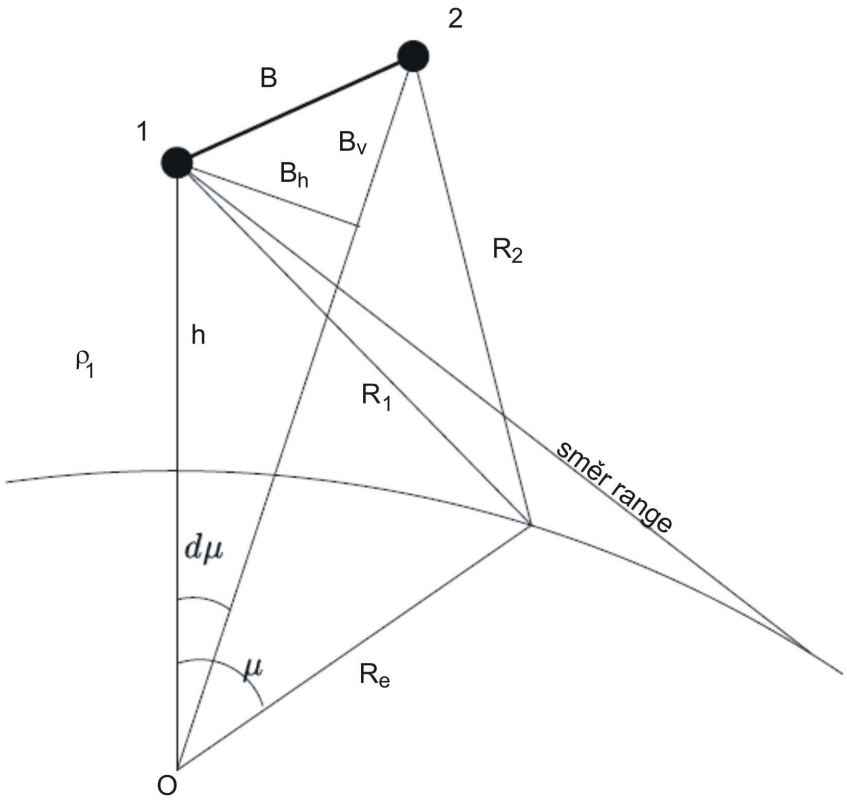
Parametry základny mohou být spočteny pokud hlavní vektory bodů M (hlavní bod), S (vedlejší bod) a P (bod na povrchu) jsou známy. Vzorec vedoucí k výpočtu základny B:

$$B = d(M,S). \tag{5.1}$$

Výpočet rovnoběžné základny $B_{//}$:

$$B_{//} = d(M,P) - d(S,P), \tag{5.2}$$

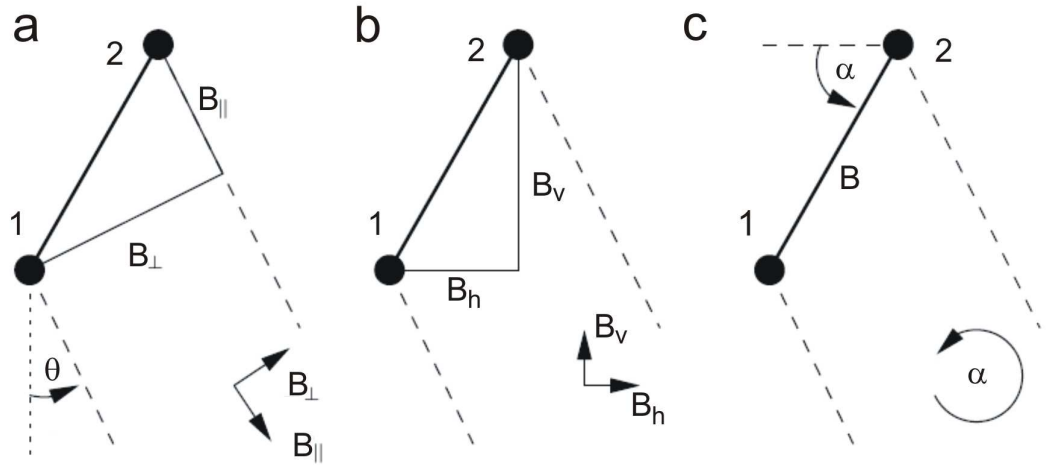
kde $d(x,y)$ vzdálenost mezi body ve směru x a y.



Obrázek 5.1: Geometrická konfigurace SAR, kde R_i jsou vektory ve směru range, ρ_1 je hlavní vektor referenčního satelitu, h je výška satelitu a μ úhel umístění polí interferogramu.

Definice výpočtu kolmé základny $B_\perp$ platí za předpokladu, že $B_\perp$ je kladná, což je v případě, že satelit, který pořídil vedlejší radarový obraz je směrem vpravo od slant range hlavního radarového obrazu. Pak je $B_\perp$ definována takto:

$$B_\perp{}^2 = B^2 - B_{//}{}^2 . \tag{5.3}$$



Obrázek 5.2: Různá znázornění základny definují její parametry: a) tečná základna $B_{//}$, kolmá základna $B_{\perp}$; b) vertikální základna B_v, horizontální základna B_h; c) délka základny B, orientace základny α. Pozice satelitu č. 1 je referenční. Platí, že $B_{//} > 0$, když platí $R_1 > R_2$, kde R_i odpovídá vzdálenosti měřenou mezi družicí a odražečem na zemském povrchu. Úhel α je počítán proti směru hodinových ručiček, a to od horizontu (ve směru pohledu) ke spojnici pozice satelitu č. 2 a referenční pozice satelitu č.1.

5.2 Typy chyb v radarových datech

Radarová data pořízená radarem se syntetickou aperturou umístěnou na družici obsahují dva základní typy chyb:

- **Chyby v poloze družice. Skládají se ze tří složek:**
  - **Radiální složka**
    Složka chyby, která je ve směru kolmém na zemský povrch.
  - **Across-track složka**
    Složka chyby, která je ve směru kolmém na rovinu oběhu družice.
  - **Along-track složka**
    Složka chyby ve směru letu družice.

- **Chyby časování přijatého signálu**

  - **Chyba doby přijetí prvního signálu**

    Odezva prvního signálu zformuje první řádku dat. Je tedy nutno zavést opravu časování ve směru azimutu Δt.

  - **Chyba doby, která uplyne mezi vysláním a přijetím signálu náležícímu prvnímu pixelu v daném řádku**

    Z tohoto důvodu se zavádí oprava časování ve směru range $\Delta\tau$. Na správném určení opravy časování ve směru range závisí určení úhlu pohledu Θ, jehož hodnota vstupuje do dalších výpočtů.

Tato diplomová práce je zaměřena na výpočet chyb časování ve směru azimutu a range. Nutno zmínit, že opravíme-li časování ve směru azimutu, pak není třeba opravovat along-track složku chyby v poloze družice.

5.3 Projevy chyb v radarových datech

Neodstraníme-li chyby uvedené v předchozí kapitole, může při zpracování radarových dat dojít k následujícím chybám:

- **Špatný výpočet posunu mezi zpracovávanými radarovými obrazy**

  Špatný výpočet posunu je způsoben v případě relativních chyb v časování. Mají-li oba radarové obrazy shodné chyby v časování, pak bude posun mezi nimi spočten správně. Teorií oprav časování radarového obrazu se zabývá kapitola 5.4.

- **Deformace georeferencovaného obrazu vůči skutečnosti**

  Takovou deformaci identifikujeme pomocí určení posunu, natočení a změny měřítka. Podrobně je tato problematika rozebrána v kapitole 6.2.

5.4 Teorie oprav časování radarového obrazu

S cílem opravit časování radarového obrazu v začátku jeho měření je nutno zavést dvě opravy. Závádí se oprava časování ve směru azimutu a oprava časování ve směru range. Vyhodnocení oprav časování je založeno na znalosti přibližných hodnot posunu ve směru azimutu a posunu ve směru range mezi radarovými obrazy. Platí, že špatně vypočtený posun ve směru azimutu resp. range odpovídá chybě v časování ve směru azimutu resp. range. Zjistíme-li hodnoty těchto posunů, pak lze vypočítat i opravy časování v obou směrech.

5.4.1 Výpočet přibližných posunů ve směru azimutu a range

Máme pár radarových obrazů, který je složen z hlavního a vedlejšího radarového obrazu. Na základě znalosti poloh družic je v počátku interferometrického zpracování vypočtena přibližná hodnota posunu ve směru azimutu a přibližná hodnota posunu ve směru range. Hodnoty přibližných posunů jsou při interferometrickém zpracování potřebné i později, kdy se na základě amplitudových vlastností obrazu vyhodnocují přesné posuny mezi párem radarových obrazů.

Rozlišení radarových obrazů je v řádu několika metrů (4,5 m ve směru azimutu a 20-30 m ve směru range), naopak nepřesnosti drah družic jsou v řádu několika centimetrů. Vzhledem k tomuto faktu jsou pro výpočet posunů uvažovány chyby v časování a chyby v poloze družice jsou zanedbány. Článek [16] uvádí následující výpočty posunů ve směru azimutu a range.

- **Výpočet posunu ve směru azimutu**

  Výše definovaná interferometrická základna leží v rovině kolmé na vektor rychlosti hlavní družice. V této rovině zároveň leží odražeč na zemském povrchu. Z definice základny vyplývá, že ke každé řádce v jednom radarovém obrazu lze přiřadit řádku v druhém radarovém obrazu. Pak posun ve směru azimutu mezi oběma radarovými obrazy spočteme takto:

$$p_a = PRF\left(t_2 - t_{2start}\right), \tag{5.4}$$

kde t_2 čas, ve kterém proběhla akvizice řádky odpovídající první řádce obrazu,

t_{2start} čas akvizice první řádky druhého radarového obrazu,

PRF frekvence vysílaných pulsů v [Hz], dle [4] se hodnota PRF vypočte takto:

$$PRF = \frac{Nl - 1}{dt_a}, \tag{5.5}$$

kde Nl celkový počet řádků (poslední minus první řádek),

dt_a azimut time posledního minus prvního řádku.

- **Výpočet posunu ve směru range**

Výpočet posunu ve směru range je založen nejprve na výpočtu pozice odražeče ze známých souřadnic středu scény $\vec{T}$, pak je „slant-range vektor“:

$$\vec{r}_i = \vec{T} - \vec{S}_i, \tag{5.6}$$

kde $\vec{T}$ souřadnice středu scény,

$\vec{S}_i$ souřadnice družice.

Posun ve směru range pak spočteme:

$$p_r = \frac{|r_2| - |r_1|}{r_r}, \tag{5.7}$$

kde r_r rozlišení ve směru range.

5.4.2 Výpočet oprav časování ve směru azimutu a range

Vyhodnocením posunů ve směru azimutu a range mezi interferogramem a syntetickým interferogramem (vygenerovaným z DMT) lze přímo získat opravy časování jak ve směru azimutu, tak ve směru range [21].

- **Oprava časování ve směru azimutu**

  Na základě znalosti rychlosti družice, rozlišení ve směru azimutu a znalosti posunu ve směru azimutu mezi interferogramem a syntetickým interferogramem spočteme přibližně hodnotu opravy časování ve směru azimutu Δt takto:

$$\Delta t = \frac{\Delta a}{v_{gr}} \Delta p_a = 0.6767 \Delta p_a [ms], \tag{5.8}$$

  kde Δt oprava časování ve směru azimutu,

  Δp_a posun ve směru azimutu mezi interferogramem a syntetickým interferogramem,

  Δa rozlišení ve směru azimutu, kdy $\Delta a \approx 4.5[m]$,

  v_{gr} rychlost stopy, kterou tvoří radarový signál na zemském povrchu, kde $v_{gr} = 6650[m.s^{-1}]$ dle [21].

- **Oprava časování ve směru range**

  Opravu časování ve směru range $\Delta \tau$ lze spočítat na základě znalosti posunu ve směru range mezi interferogramem a syntetickým interferogramem a časového rozlišení jednoho pixelu:

$$\Delta \tau = \Delta p_r . s_p [\mu s], \tag{5.9}$$

  kde $\Delta \tau$ oprava časování ve směru range

  Δp_r posun ve směru range mezi interferogramem a syntetickým interferogramem

  s_p časové rozlišení jednoho pixelu; $s_p = \frac{1}{f} = 0.052736[\mu s]$, kde (5.10)

  $f = 18.962468[MHz]$ vzorkovací frekvence ve směru range. (5.11)

Kapitola 6

Teorie georeferencování, Dopplerův centroid

Po vysvětlení pojmu georeferencování a specifikaci podmínek, které je nutno splnit, aby mohla být použita metoda tzv. přímého georeferencování, tato kapitola obsahuje parametry deformací již georeferencovaného obrazu. Na závěr je vysvětlen pojem Dopplerův centroid.

6.1 Teorie georeferencování

Pod pojmem georeferencování se skrývá převod dat ze souřadnicového systému radarového obrazu do referenčního souřadnicového systému. Existuje několik metod přímého georeferencování. Článek [18] k přímému georeferencování využívá identifikaci bodů na obou radarových obrazech. Další metodou, použitou v případě této diplomové práce, je přímé georeferencování na základě jednoho radarového obrazu a známé výšky nad elipsoidem. Tato výška je získána ze známého externího DMT. Možnost využití této metody je podmíněno následujícími podmínkami, které tvoří soustavu tří rovnic:

- **Vzdálenost družice a odražeče musí odpovídat umístění daného odražeče v radarovém obrazu. Pak je slant range:**

$$(x-x_s)^2+(y-y_s)^2+(z-z_s)^2=r^2, \tag{6.1}$$

kde x, y, z souřadnice odražeče,

x_s, y_s, z_s souřadnice družice,

r slant-range daného odražeče resp. vzdálenost měřená mezi družicí a odražečem na zemském povrchu.

- **Bod musí ležet na zemském povrchu – elipsoidu resp. ve výšce h nad ním. Pak platí:**

$$\frac{x^2+y^2}{(N+h)^2}+\frac{z^2}{\left(N\left(1-e^2\right)+h\right)^2}=1, \tag{6.2}$$

kde N příčný poloměr křivosti,
e první excentricita elipsoidu.

- **Spojnice bodu a odražeče se od směru kolmého k letu družice odchyluje o tzv. squint angle ϕ_s, který odpovídá Dopplerovu centroidu f_v:**

$$f_v=\frac{2}{\lambda}\frac{\left(\vec{V}_s-\vec{V}_t\right)\cdot\left(\vec{R}_s-\vec{R}_t\right)}{\left|\vec{R}_s-\vec{R}_t\right|}, \tag{6.3}$$

kde $\vec{V}_s$ rychlost družice,
$\vec{V}_t$ rychlost odražeče.

Nezbytnou podmínkou pro jednoznačné určení bodu na povrchu Země je znalost polohy odražeče, resp. zda je vpravo či vlevo od dráhy letu družice. Poloha odražeče je dána konstrukčně.

Vlivem chyb uvedených v kap 5.2 dochází k deformacím georeferencovaných radarových obrazů vůči skutečnosti.

6.2 Deformace georeferencovaného obrazu

Vlivem chyb v radarových datech uvedených v kap. 5.2 dochází k různým deformacím georeferencovaného obrazu resp. vzniklého interferogramu. Tuto deformaci vyhodnocujeme pomocí parametrů:

- **Posun**

  Na vznik posunů mají vliv všechny jmenované chyby v kap. 5.2. V praxi však platí, že je rozlišení radarového obrazu řádově větší než nepřesnosti v poloze družic.

Z tohoto důvodu vliv chyb v poloze družic nebudeme uvažovat. Zůstává nám jen již zmíněný vliv chyb v časování na posun.

- **Natočení**

  Velikost natočení je způsobena nepřesností Dopplerova centroidu (viz. kap. 6.3).

- **Změna měřítka**

  Změna měřítka je způsobena nepřesností oscilátorů, které udávají vzorkovací frekvenci a frekvenci vysílaných pulsů (PRF).

Vyhodnocení šesti parametrů je založeno na výpočtu transformace vhodně zvolených identických bodů mezi souřadnicovým systémem radarového obrazu (x, y) a souřadnicovým systémem mapy (X, Y). Následuje odvození afinní transfotmace se šesti stupni volnosti.

Obecná rovnice afinní transformace:

$$X = \lambda.\cos\alpha.x - \mu\sin.y + X_0, \tag{6.4}$$

$$Y = \lambda.\sin\alpha.x + \mu.\cos.y + Y_0, \tag{6.5}$$

kde α natočení osy X,

β natočení osy Y,

λ měřítkový koeficient ve směru osy X,

μ měřítkový koeficient ve směru osy Y,

X_0 posun ve směru osy X,

Y_0 posun ve směru osy Y.

Obecný maticový zápis:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, \tag{6.6}$$

kde vektor $$l = \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}, \tag{6.7}$$

matice posunů $$P = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix}, \tag{6.8}$$

transformační matice $$T = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}, \tag{6.9}$$

vektor $$m = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}. \tag{6.10}$$

Jiný maticový zápis afinní transformace:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x & 0 & y & 0 & 1 & 0 \\ 0 & x & 0 & y & 0 & 1 \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} \lambda.\cos\alpha \\ \lambda.\sin\alpha \\ -\mu.\sin\beta \\ \mu.\cos\beta \\ X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix}, \tag{6.11}$$

kde vektor $$l = \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}, \tag{6.12}$$

matice $$A = \begin{pmatrix} x & 0 & y & 0 & 1 & 0 \\ 0 & x & 0 & y & 0 & 1 \end{pmatrix}, \tag{6.13}$$

vektor $$h = \begin{pmatrix} \lambda.\cos\alpha \\ \lambda.\sin\alpha \\ -\mu.\sin\beta \\ \mu.\cos\beta \\ X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix}, \tag{6.14}$$

Pomocí matic lze pak vektor *h* vypočítat takto:

$$h = \left(A^T.A\right)^{-1}.A^T.l\,. \tag{6.15}$$

Po výpočtu vektoru *h* resp. šesti parametrů (*a, b, c, d,* X_0, Y_0) je nutno spočítat přesnost, s kterou byly určeny. Proto nejprve spočteme vektor oprav:

$$v = A.h - l\,, \tag{6.16}$$

dále střední chybu jednotkovou:

$$m_0 = \sqrt{\frac{v^T.v}{n-k}}\,, \tag{6.17}$$

kde n = 2.počet identických bodů,
k = 6.

Na závěr kovarianční matici:

$$C = \left(A^T.A\right)^{-1} \tag{6.18}$$

Hodnoty na diagonále kovarianční matice C označme (a', b', c', d', $X_0^{'}$, $Y_0^{'}$), potom jednotlivé střední chyby parametrů (a, b, c, d, X_0, Y_0) spočteme takto:

$$m_a = m_0.\sqrt{a'} \tag{6.19}$$

$$m_b = m_0.\sqrt{b'} \tag{6.20}$$

$$m_c = m_0.\sqrt{c'} \tag{6.21}$$

$$m_d = m_0.\sqrt{d'} \tag{6.22}$$

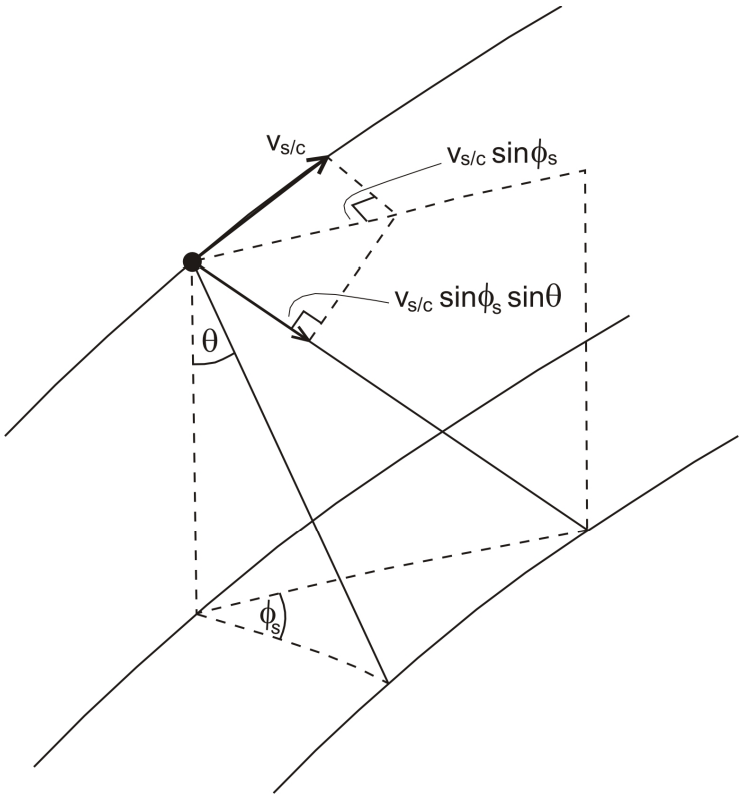
$$m_{X_0} = m_0.\sqrt{X_0^{'}} \tag{6.23}$$

$$m_{Y_0} = m_0.\sqrt{Y_0^{'}} \tag{6.24}$$

6.3 Dopplerův centroid

Uvažujme teoreticky, že střed anténního paprsku je kolmý ke směru letu a v tomto směru je Dopplerův posun nulový. Technicky stále nelze zajistit, aby byl střed anténního paprsku přesně kolmý na směr letu. Tudíž středu anténního paprsku neodpovídá nulový Dopplerův posun resp. Dopplerův centroid. Vždy vzniká tzv. squint angle ϕ_s - úhel mezi středem anténního paprsku a úhlem kolmým na směr letu. Nutno brát v úvahu, že se squint angle ϕ_s mění ve směru range. Situace je znázorněna na obr. 6.1 a 6.2.

Při georeferencování radarového obrazu platí, že střed anténního paprsku není přesně kolmý ke směru letu. Výsledkem jsou špatně spočtené souřadnice. Nepřesně odhadnutý Dopplerův centroid tudíž způsobí natočení radarového obrazu.



Obrázek 6.1: Doppler centroid a jeho parametry: squint angle ϕ_s, úhel pohledu θ a vektor rychlosti $v_{s/c}$. Zdroj obrázku [2].

Dopplerův centroid lze dle literatury [17] vypočítat na základě znalosti squint angle ϕ_s takto:

$$f_{DC} = -\frac{2v_{s/c}}{\lambda}\sin\phi_s, \tag{6.25}$$

kde $v_{s/c}$ vektor rychlosti družice - nosiče SAR,

λ vlnová délka SAR systému,

ϕ_s squint angle

Pravoúhlá anténa s délkou L_a a šířkou D_a generuje antenní diagram (zobrazen na obr. 6.2) jako funkci úhlu vyzařování svazku ϕ. Šířka paprsku ve směru range je:

$$\beta_r = 0.886\frac{\lambda}{D_a} \tag{6.26}$$

a šířka paprsku ve směru azimutu:

$$\beta_a = 0.886\frac{\lambda}{L_a}. \tag{6.27}$$

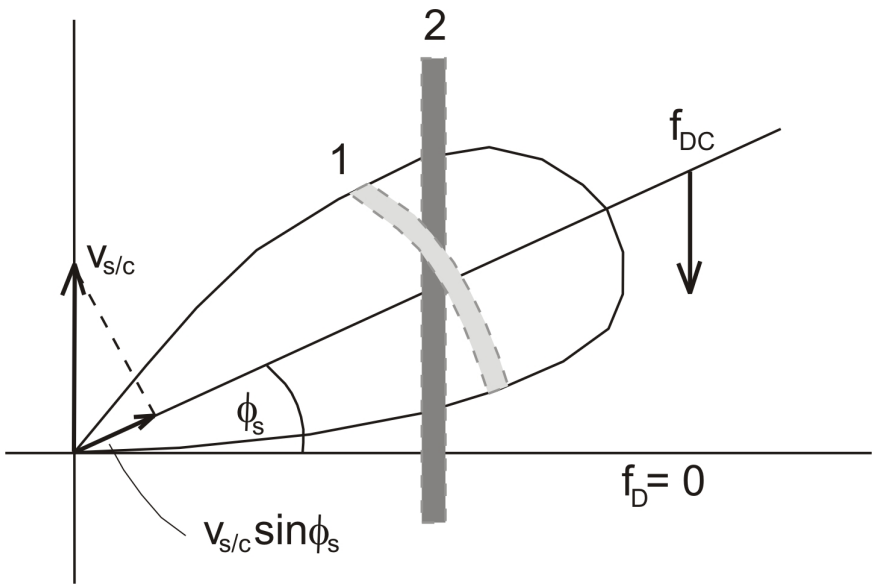
Pro ERS-1 a ERS-2 dosahují těchto hdonot:

$$\beta_r = 2.870°, \tag{6.28}$$

$$\beta_a = 0.287°. \tag{6.29}$$

Pro ERS má pak stopa radaru šířku ve směru azimutu:

$$W_a = \frac{\lambda}{L_a}R = 4.8km \tag{6.30}$$



Obrázek 6.2: Obrázek zachyje anténní diagram, směr Dopplerova centroidu, dále definuej squint angle ϕ_s. Elementy plochy oblasti č. 1 jsou ve stejné range vzdálenosti od zdroje, zatímco oblast č. 2 zobrazuje elementy plochy skrze anténní diagram. f_D značí nulový Dopplerův posun. Zdroj obrázku [2].

Změnu Dopplerova posunu lze vyjádřit pomocí tzv. Dopplerovy šířky pásma B_{Dop}, která je se spočte:

$$B_{Dop} = \frac{2\beta_a v_{s/c}}{\lambda}. \tag{6.29}$$

Dopplerova šířka pásma B_{Dop} ovlivňuje rozlišení ve směru azimutu Δ_a radarového obrazu takto:

$$\Delta_a = \frac{v_{s/c}}{B_{Dop}}. \tag{6.30}$$

Kapitola 7

Zpracování interferogramu

Tato kapitola je věnována jednotlivým krokům procesu zpracování interferogramu, které umožňuje software DORIS. Uvedeny jsou kroky, které byly použity při praktickém zpracování této diplomové práce. Detailněji jsou rozebrány kroky COARSEORB a COARSECORR, jejichž správné použití je základem k výpočtu oprav časování ve směru azimutu a range. Krok SLANT2H je z důvodu navazujících výpočtů rovněž podrobněji rozebrán. Zdrojem teoretického základu a vzorců je literatura [2], [4] a [19]. Jednotlivé kroky jsou z důvodu jejich dalšího použití v textu této diplomové práce očíslovány.

(1.) COARSEORB

Zpracovávané hlavní a vedlejší radarové obrazy byly pořízeny dvěma různými SAR, z odlišných míst a v různých časových okamžicích. Vlivem těchto faktorů může nastat posun podélný s dráhou nosiče SAR (v řádu tisíců řádků) a posun příčný na dráhu nosiče SAR (v řádu desítek pixelů). Dále jsou tyto posuny značeny jako posun (řádek, pixel).

Krok COARSEORB počítá koregistraci radarových obrazů založenou na znalosti orbit vedlejšího a hlavního radarového obrazu s přesností okolo 30 obrazových bodů. Je nejrychlejším způsobem získání hrubého posunu. Výsledné hodnoty hrubé koregistrace jsou základem výpočtu kroku (2.) COARSECORR.

Realizaci kroku COARSEORB lze rozdělit do tří kroků:

1. Pro střed hlavního radarového obrazu o souřadnicích (řádek,pixel) je spočtena pozice bodu P na elipsoidu v souřadnicích (x, y, z v souřadnicovém systému orbit).
2. Na základě Dopplerovy rovnice je spočtena pozice vedlejšího satelitu (satelit, který pořídil vedlější radarový obraz) odpovídající bodu P na elipsoidu a spočteny souřadnice (řádek, pixel) v systému vedlejšího radarového obrazu.
3. Rozdíl mezi vedlejším a hlavním radarovým obrazem je definován jako posun (řádek, pixel).

Posun pak definujeme takto:

$$P_s(l,p) = P_m(l,p) + posun(l,p), \tag{7.1}$$

kde l řádek,

p pixel,

$posun(l,p)$ počítaný posun,

$P_m(l,p)\ \Delta t$ souřadnice bodu P na hlavním radarovém obrazu ,

$P_s(l,p)\ \Delta p_a$ souřadnice toho samého bodu na vedlejším radarovém obrazu.

Rovnice, které software DORIS používá pro výpočet COARSEORB jsou uvedeny v [4] v příloze C, kapitole C.6.

Obecně lze tedy říci, že jeden radarový obraz musí být posunut tak, aby libovolný obrazový bod na jednom obrazu odpovídal tomu samému obrazovému bodu na druhém radarovém obrazu.

(2.) COARSECORR

Spočítá přesný posun ve směru azimutu (řádek) a posun ve směru range (pixel) mezi hlavním a vedlejším radarovým obrazem, a to s přesností několika obrazových bodů. Výsledkem je jeden posun pro celou scénu. Využívá znalost magnitudy obrazů a přibližnou znalost hodnoty tohoto posunu.

(3.) M_FILTAZI

Provede filtraci hlavního radarového obrazu ve směru azimutu. Tento krok musí být proveden mezi hrubou (viz. krok (2.) COARSECORR) a jemnou (viz. krok (5.) FINE) koregistrací. Důvodem je použití posunu získaného z hrubé koregistrace. V průběhu filtrování jsou nepřekrývající se části obrazu odříznuty. Takové obrazy mohou mít před tím různé hodnoty Dopplerova centroidu.

(4.) S_FILTAZI

Krok S_FILTAZI je stejný jako krok (3.) M_FILTAZI, s tím rozdílem, že provede filtraci vedlejšího radarového obrazu, a to opět ve směru azimutu.

(5.) FINE

Krok FINE obsahuje jemnou koregistraci radarových obrazů a vychází z hodnot posunu (řádek, pixel) vypočteného v (2.) COARSECORR. Zpřesnění posunu (řádek, pixel) je založeno na výpočtu korelace mnoha malých polí radarového obrazu. Opět je zde využita známá magnituda radarových obrazů.

(6.) COREGPM

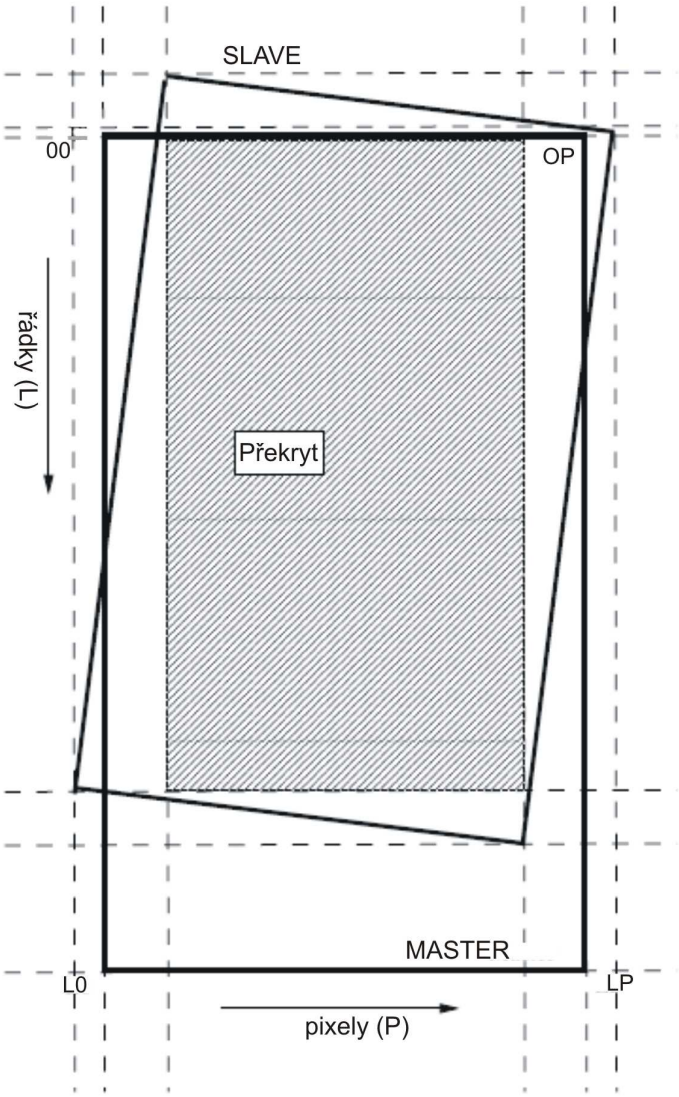
Proloží hodnoty spočtené v kroku (5.) FINE polynomem druhého stupně:

$$f(x,y)=\sum_{i=0}^{d}\sum_{j=0}^{i}\alpha_{i-j,j}x^{i-j}y^{i} \ . \qquad (7.2)$$

Tímto výpočtem jsou zajištěny hodnoty parametrů koregistrace a dále zbytkové chyby.

(7.) RESAMPLE

Tento krok zajistí převzorkování vedlejšího radarového obrazu na hlavní radarový obraz, a to na základě transformačního modelu vzniklého po provedení kroku (6.) COREGPM. Obrázek 7.1 znázorňuje překryt hlavního a vedlejšího radarového obrazu.



Obrázek 7.1: Překryt hlavního (MASTER) a vedlejšího (SLAVE) radarového obrazu. Zdroj obrázku [4].

(8.) FILTRANGE

Vlivem nepatrně rozdílných úhlů pohledu z dvou senzorů SAR se spektra dvou radarových obrazů ve směru range kompletně nepřekrývají. Toto opraví krok FILTRANGE, kdy pomocí filtrace obou radarových obrazů v range směru provede odříznutí nepřekrývajících se částí spektra. Filtrování radarových obrazů ve směru range redukuje šum vzniklý výše zmíněným vlivem.

(9.) INTERFERO

Krok INTERFERO spočítá komplexní interferogram. Fáze dvou odpovídajících si scén jsou obrazový bod po obrazovém bodu odečteny (s využitím konjugovaného násobení):

$$I(i,j) = S_1(i,j) \cdot S_2(i,j) = |S_1||S_2|e^{(\varphi_1 - \varphi_2)}, \tag{7.3}$$

kde $I(i,j)$ hodnota interferogramu pro (i,j) obrazový bod,

$S_k(i,j)$ komplexní hodnota (i,j) obrazového bodu hlavní ($k=1$) nebo vedlejší ($k=2$) scény.

(10.) COMPREFPHA

Vypočte „flat-Earth fázi“. Platí, že fáze přijatého signálu (tj. rozdíl mezi přijatým a vyslaným signálem) velmi závisí na vzdálenosti mezi vysílačem/přijímačem a odražečem. Cílem je, aby byly fáze interferogramu shodné, pokud zobrazovaná oblast nemá topografii.

(11.) SUBTRREFPHA

Dojde k odečtení „flat-Earth fáze“ od interferogramu. Před odečtením „flat-Earth fáze“ se interferogram skládá z rovnoběžných řádků ve směru azimutu. Po odečtení je v interferogramu nejvýraznějším prvkem topografie.

(12.) COHERENCE

Spočte koherenci jako měřítko spolehlivosti fáze v malém okolí obrazového bodu (fáze je náhodná hodnota v nekorelované oblasti). Komplex koherence je definován takto:

$$\gamma_c = \frac{\varepsilon\{S_1 \cdot S_2\}}{\varepsilon\{S_1 \cdot S_1^*\} \cdot \varepsilon\{S_2 \cdot S_2^*\}}, \tag{7.4}$$

kde $\mathcal{E}$ $\mathcal{E}$ operátor je střední hodnota podél předem definované oblasti,

$|\gamma_c| = \hat{\gamma}$ hodnota reálné koherence je měřítkem kvality interferogramu.

(13.) COMPREFDEM

Vypočte fázi odpovídající danému DMT, tedy konvertuje DMT do systému radaru. Poté DMT vypadá jako interferogram bez šumu a dekorelovaných oblastí.

(14.) SUBTRREFDEM

Odečte od interferogramu fázi spočtenou v kroku (13.) COMPREFDEM. Cílem je eliminovat topografický signál odečtením externího digitálního výškového modelu.

(15.) FILTPHASE

Vyfiltruje fázi s cílem snížit šum radarového obrazu. Obvykle se používají konvoluční filtry.

(16.) UNWRAP

Zajistí rozbalení fáze. Nejednoznačná fáze v intervalu $\langle -\pi, \pi)$ je převedena na jednoznačnou hodnotu, kterou může být jakákoliv reálná hodnota. Řešení je ve své podstatě nejednoznačné, a to i když je jeden bod definován tak, že je fáze známá. Obecně lze říci, že je rozbalení fáze kritickým krokem procesu zpracování interferogramu. V případě, že radarový obraz zobrazující fázi neobsahuje residua, tj. suma zabalených fázových rozdílů mezi čtyřmi sousedícími obrazovými body v malé oblasti je 0, je zpracování této fáze jednodušší. Tento předpoklad je splněn při dodržení dvou podmínek:

1. Fázové rozdíly mezi sousedícími obrazovými body nepřesahují hodnotu π.
2. Radarový obraz neobsahuje šum.

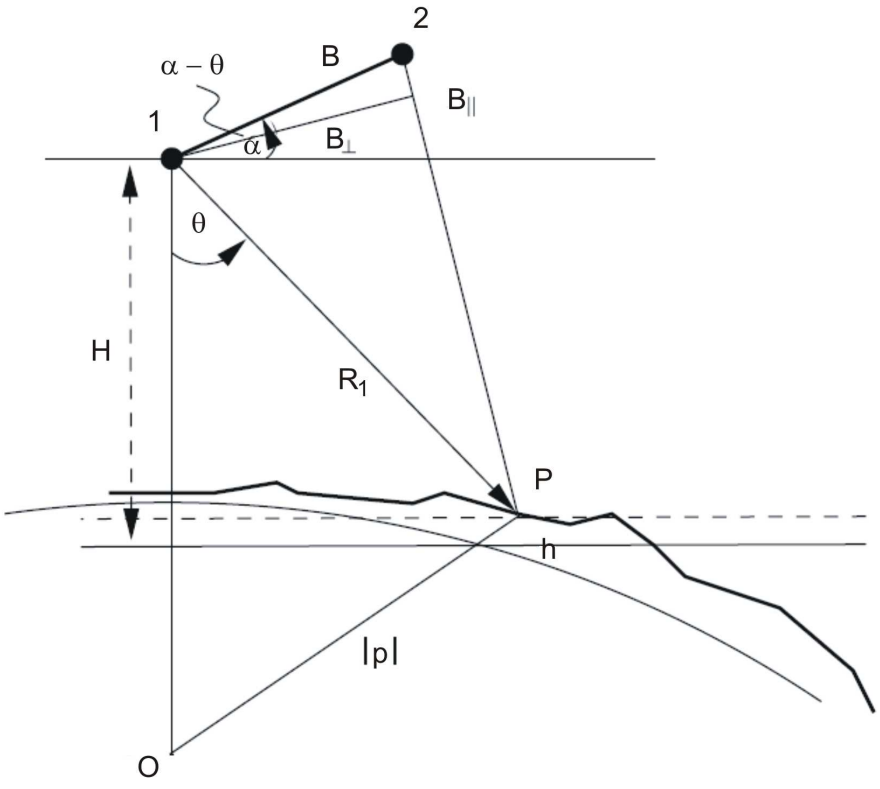
Prakticky jsou tyto podmínky málokdy splněny. I v případě, kdy se na zkoumaném území nevyskytují svahovité oblasti, radarový obraz obsahuje šum. To je způsobeno dekorelací v oblastech snímku, kde je vegetace nebo vodní plochy. Z toho plyne, že řešení tohoto problému velmi záleží na zkoumané oblasti a dále na zvolené metodě. Největší problém při rozbalení fáze nastává, pokud je radarový obraz rozdělen souvislými dekorelovanými oblastmi (např. řekou) na dva či více velkých území s dobrou koherencí. V tomto případě musí být rozbalení fáze provedeno odděleně, tedy i nezávisle.

(17.) SLANT2H

Tento krok počítá výšky v souřadnicovém systému radaru. Software DORIS umožňuje výpočet výšek v souřadnicovém systému radaru pomocí tří různých metod:

- Metoda ambiguity - používá relativní výškový rozdíl odpovídající rozsahu 2π .
- Metoda schwabisch - využívá polynomy ke srovnání fáze s referenční fází.
- Metoda rodriguez - využívá geometrii

Geometrie pro krok SLANT2H je naznačena na obrázku 7.2.



Obrázek 7.2: Geometrie kroku (17.) SLANT2H. Zdroj obrázku [4].

Při praktickém zpracování diplomové práce byla použita metoda ambiguity. Výstupem metody ambiguity jsou hodnoty výšek h. Georeferencování probíhá současně.

Na základě definice základny (odvození viz. kap. 5.1) a dle [17] platí:

$$B_{//} = r_1 - r_2, \tag{7.5}$$

$$B_{//} = B\sin(\theta - \alpha), \tag{7.6}$$

$$B_{\perp} = B\cos(\theta - \alpha). \tag{7.7}$$

Dále platí:

$$\phi_i = -\frac{4\pi}{\lambda} r_i + \phi_{obj}. \tag{7.8}$$

Obsah rozbaleného interferogramu:

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 - \phi_R = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{//} - \phi_R, \tag{7.9}$$

$$\frac{d\phi}{d\theta} = -\frac{4\pi}{\lambda}\frac{dB_{//}}{d\theta} = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{\perp}. \tag{7.10}$$

Geometrická rovnice pak je:

$$h = H - r_1\cos\theta, \tag{7.11}$$

$$\frac{dh}{d\theta} = r_1\sin\theta. \tag{7.12}$$

Relativní výškový rozdíl:

$$\frac{dh}{d\phi} = \frac{dh}{d\theta}\frac{d\theta}{d\phi} = -\frac{\lambda}{4\pi}\frac{r_1\sin\theta}{B_{\perp}} = -\frac{\lambda}{4\pi}\frac{r_1\sin\theta}{B_h\cos\theta + B_v\sin\theta}. \tag{6.13}$$

Výsledná rovnice převádějící fázi na výšku je:

$$h = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{r_1 \sin\theta}{B_h \cos\theta + B_v \sin\theta} \phi \,. \tag{7.14}$$

Kapitola 8

Zpracování radarových dat

8.1 Oprava časování hlavního radarového obrazu

Cílem prvního kroku praktické části této diplomové práce je vyhodnocení chyb časování v začátku měření hlavního radarového obrazu, a to ve směru azimutu a range. S cílem zjistit hodnoty těchto chyb, bylo provedeno srovnání interferogramu a syntetického DMT vygenerovaného z digitálního modelu terénu.

8.1.1 Zpracovávaná data

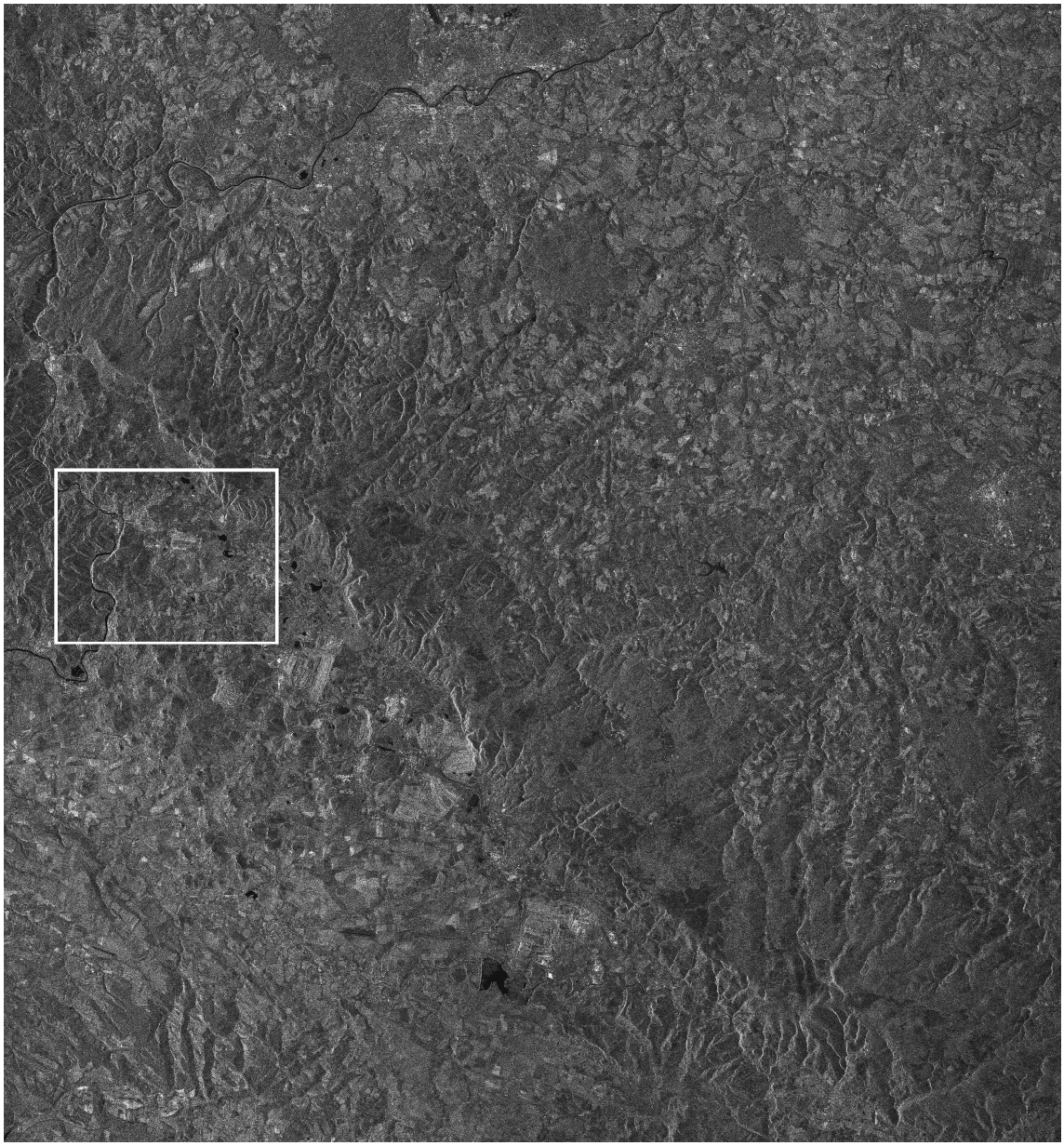
Celkem byly zpracovány čtyři tandem páry radarových obrazů, a to z každé skupiny dat jeden pár. Vstupními daty pro každou skupinu dat je hlavní radarový obraz ve formátu .slc a dále vedlejší radarový obraz ve formátu .slc, který společně s hlavním radarovým obrazem tvoří tandem pár. Nedílnou součástí vstupních dat je syntetický DMT v binárním formátu. Přehled zpracovaných tandem párů udává tabulka 8.1.

Skupina dat	Typ obrazu	Číslo obrazu	Datum akvizice	Název družice	Délka základny [m]
1	hlavní	23795	1999-11-08	ERS-2	-160
	vedlejší	43468	1999-11-07	ERS-1	
2	hlavní	23428	1996-01-07	ERS-1	-69
	hlavní	3755	1996-01-08	ERS-2	
3	hlavní	4986	1996-04-03	ERS-2	83
	vedlejší	24659	1996-04-02	ERS-1	
4	hlavní	5487	1996-05-08	ERS2	103
	vedlejší	25160	1996-05-07	ERS1	

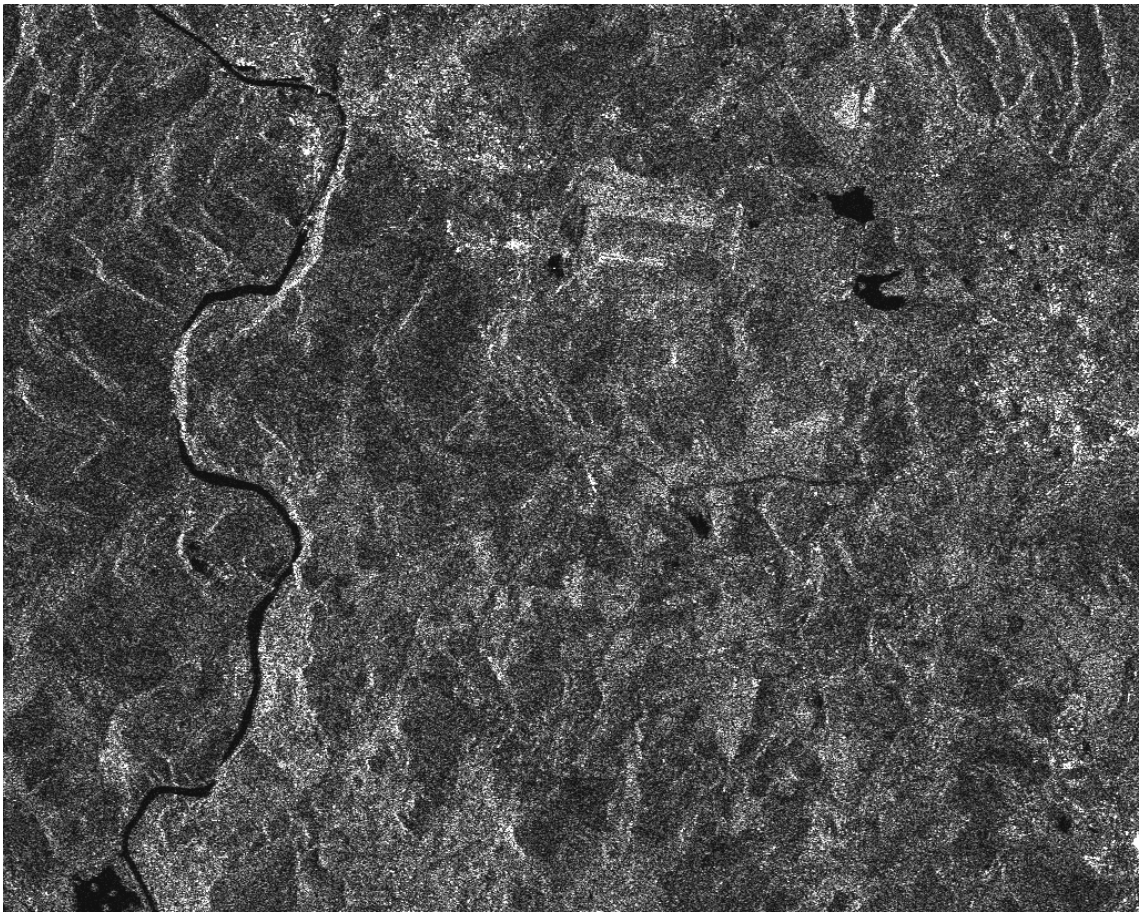
Tabulka 8.1: Přehled hlavních a vedlejších radrových obrazů tzv. tandem párů, u kterých byly zjištěny chyby v časování hlavního radarového obrazu.

8.1.2 Postup zpracování radarových dat

Vzhledem k velikosti vstupních radarových obrazů a tedy časové i technické náročnosti zpracování bylo rozhodnuto, že postačí zpracovat výřezy z původních radarových obrazů. Po volbě vhodného území, které zobrazuje jak řeky, doly, hory, ale např. i mosty, byl proveden výřez (viz. obr. 8.2) z původního radarového obrazu (viz. obr. 8.1).



Obrázek 8.2: Původní radarový obraz s vyznačením vybraného území výřezu.



Obrázek 8.1: Ukázka výřezu původního radarového obrazu.

V software DORIS byly postupně spuštěny dávky:

- **Doris2.in, která spouští příkazy:**

(1.) *coarseorb* - vypočte offset radarových obrazů z přesných orbit družic
(2.) *coarsecorr* - vypočte offset radarových obrazů z magnitudy obrazu na základě přibližné znalosti hodnoty tohoto offsetu
(3.) *m_filtazi* - provede filtraci hlavního radarového obrazu ve směru azimutu
(4.) *s_filtazi* - provede filtraci vedlejšího radarového obrazu ve směru azimutu
(5.) *fine* - provede jemnou koregistraci, vychází z dat *coarsecorr*
(6.) *coregpm* - proloží ofsetty z předešlého kroku *fine* polynomem druhého stupně

- **Doris4.in, která spouští příkazy:**

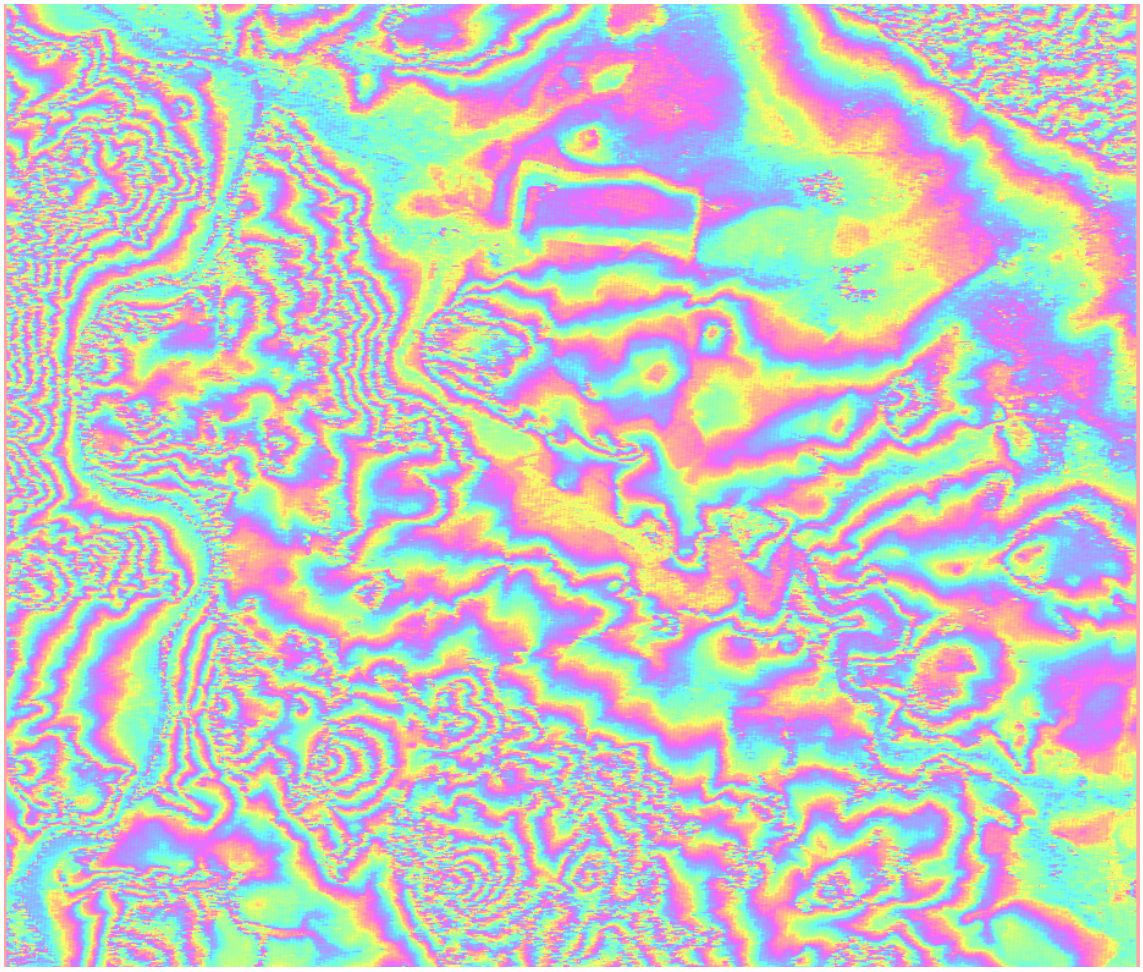
(7.) *resample* - provede převzorkování vedlejšího radarového obrazu na hlavní
(8.) *filtrange* - provede filtraci obou radarových obrazů v range směru - provede odříznutí nepřekrývajících se částí spektra
(9.) *interfero* - odečte fáze obou radarových obrazů – vypočte interferogram
(10.) *comprefpha* - vypočte „flat-Earth fázi“
(11.) *subtrrefpha* - odečte „flat-Earth fázi“ od interferogramu
(12.) *coherence* - spočte koherenci nebo-li spolehlivost interferogramu
(13.) *filtphase* - vyfiltruje fázi s cílem snížení šumu

- **Doris7.in, která spouští příkaz:**

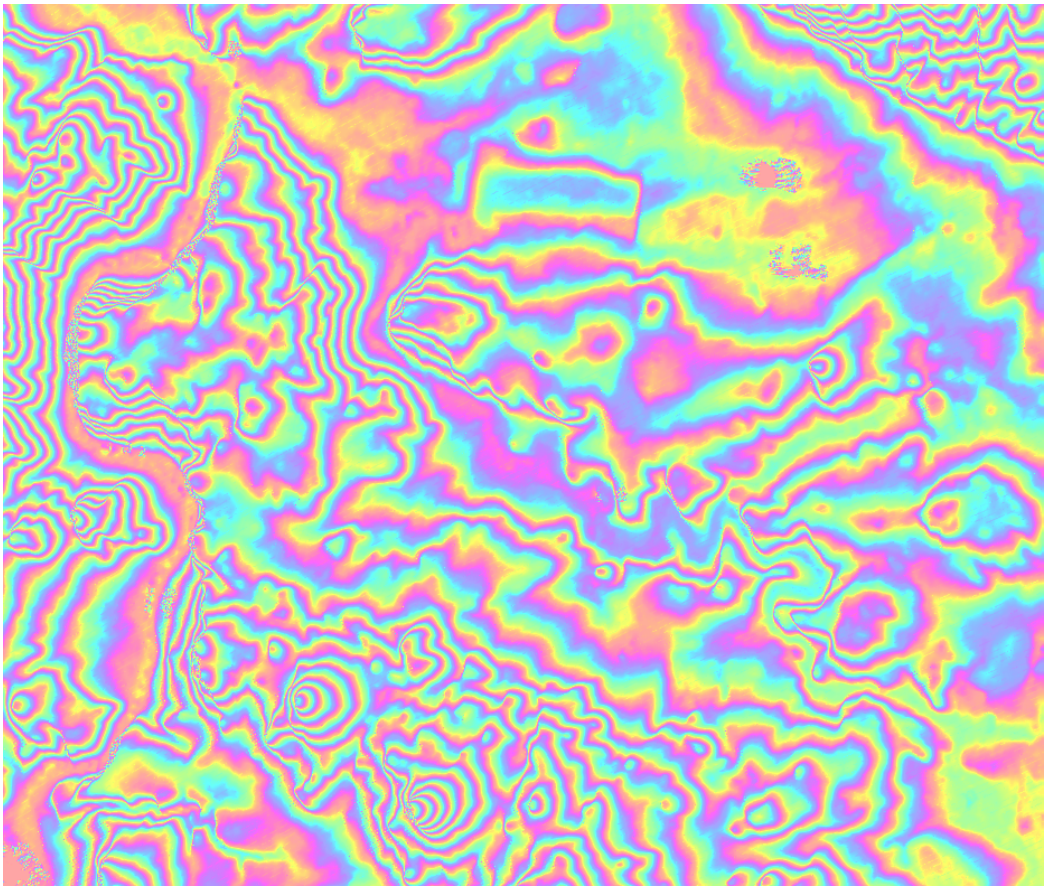
(14.) *comprefdem* - vypočte fázi odpovídající danému DMT tedy konvertuje DMT do systému radaru

Vzniklý interferogram (*tandem.int.filt*) byl graficky zobrazen. Syntetický interferogram (*refdem.raw*) byl nejprve tzv. zfázován (fáze je převedena na komplexní číslo), pak graficky zobrazen.

Obrázky 8.3 resp. 8.4 obsahují výsledky grafického zobrazení inteferogramu resp. syntetického interferogramu pro tandem skupiny dat č. 1.



Obrázek 8.3: Interferogram *tandem.ras* o rozměrech 929 x 788px,
tandem pár ze skupiny dat č. 1.



Obrázek 8.4: Syntetický interferogram *refdem.ras* o rozměrech 929 x 788px, tandem pár ze skupiny dat č. 1.

Na obou interferogramech byl zvolen identický bod, jehož souřadnice byly určeny použitím grafického software Corel Draw 11. Hodnoty souřadnic ve směru azimutu a range byly od sebe odečteny. Vzniklé souřadnicové rozdíly resp. posuny ve směru azimutu a range byly ve všech případech v rozmezí ± 10px, viz. tab. 8.2.

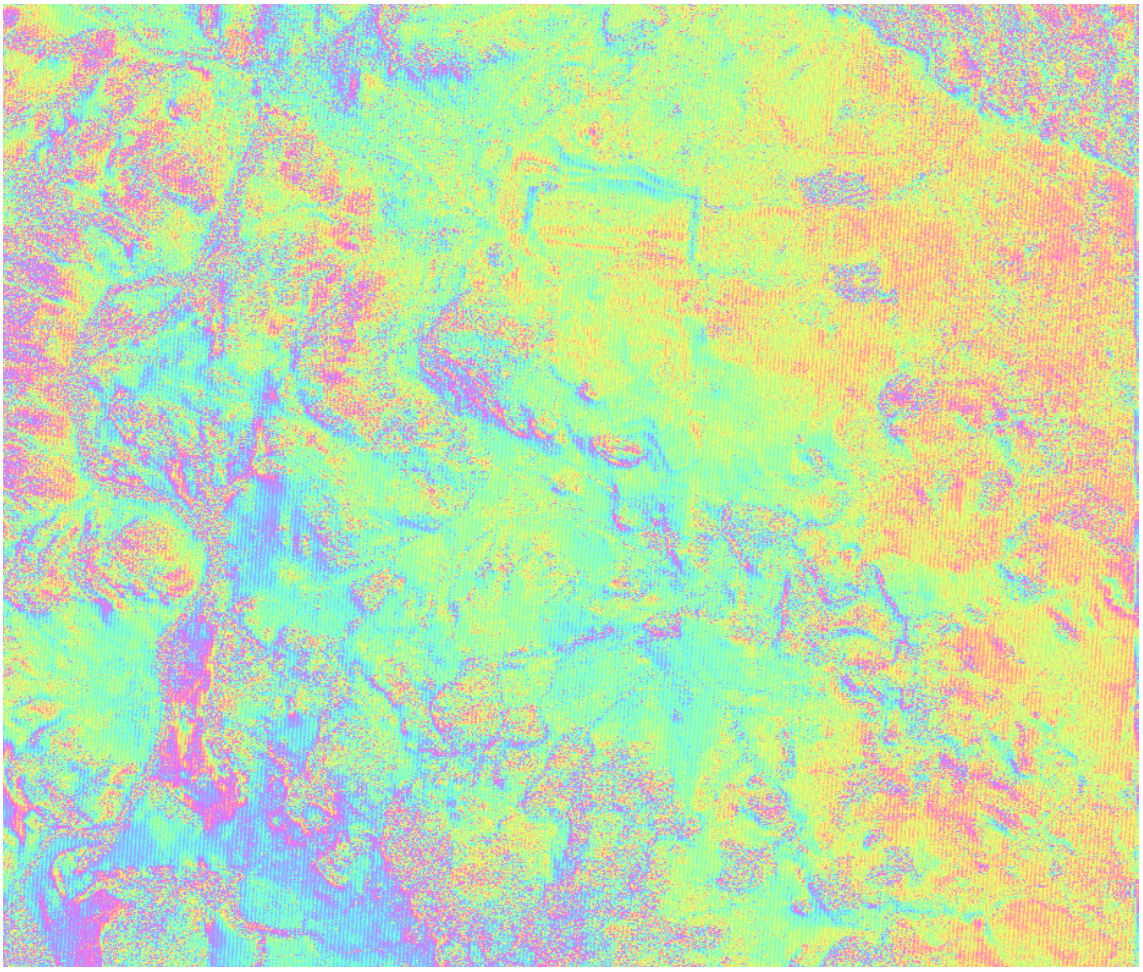
Skupina dat	**Tandem pár**		**Odečtený posun ve směru**	
	hlavní obraz	**vedlejší obraz**	**range [px]**	**azimutu [px]**
1	23795	43468	+1	+2
2	23428	!3755	-5	+5
3	4986	24659	-5	+2
4	5487	25160	+2	-5

Tabulka 8.2: Odečtené posuny ve směru azimutu a range

Na základě tohoto faktu bylo možno pokračovat následovně. V dávce *doris7.in* na řádku *SRD_OFFSET* byly nastaveny odečtené posuny ve směru azimutu a range a následně spuštěn příkaz:

(15.) *subtrrefdem* - odečte od interferogramu fázi spočtenou v *comprefdem*

Výsledný soubor *subtracted.raw* byl graficky zobrazen a posouzena jeho jednolitost barev. S cílem zlepšení jednolitosti barev výsledného obrazu bylo vyzkoušeno několik hodnot posunů ve směru azimutu a range tak, aby byl výsledný obraz co nejvíce barevně jednolitý. Obrázek 8.5 je ukázkou barevně jednolitého obrazu. Výsledné hodnoty takto určených posunů jsou uvedeny v tab. 8.3.



Obrázek 8.5: Grafické zobrazení barevně jednolitého výstupu po provedení kroků (1.) až (14.), následném nastavení výsledných posunů v obou směrech v dávce *doris7.in* na řádku *SRD_OFFSET* a spuštění kroku (15.). Ukázka platí pro tandem pár ze skupiny dat č. 1.

Skupina dat	Tandem pár		Výsledný posun ve směru	
	hlavní obraz	vedlejší obraz	range Δp_r	azimutu Δp_a
1	23795	43468	+1	-3
2	23428	3755	-3	+3
3	4986	24659	+1	-3
4	5487	25160	-3	+3

Tabulka 8.3: Odečtené posuny ve směru azimutu a range

Ze získaných hodnot posunů mezi interferogramem a syntetickým interferogramem lze přímo získat opravy časování hlavního radarového obrazu. Podle vzorce (5.9) byly spočteny hodnoty opravy časování hlavního radarového obrazu ve směru range $\Delta\tau$ a podle vzorce (5.8) byly spočteny hodnoty opravy časování hlavního radarového obrazu ve směru azimutu Δt. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 8.4. Při výpočtech je nutno hodnotu Δp_a násobit hodnotou 5, a to z důvodu použití funkce multilook při zobrazování interferogramů.

Skupina dat	Tandem pár		Opravy časování ve směru	
	hlavní obraz	vedlejší obraz	range $\Delta\tau \ [ms]$	Azimutu $\Delta t \ [s]$
1	23795	43468	0,000052736	-0,0101505
2	23428	3755	-0,000474624	0,0060903
3	4986	24659	0,000052736	-0,0101505
4	5487	25160	0,000052821	-0,0101505

Tabulka 8.4: Výsledné hodnoty oprav časování hlavního radarového obrazu ve směru range a azimutu

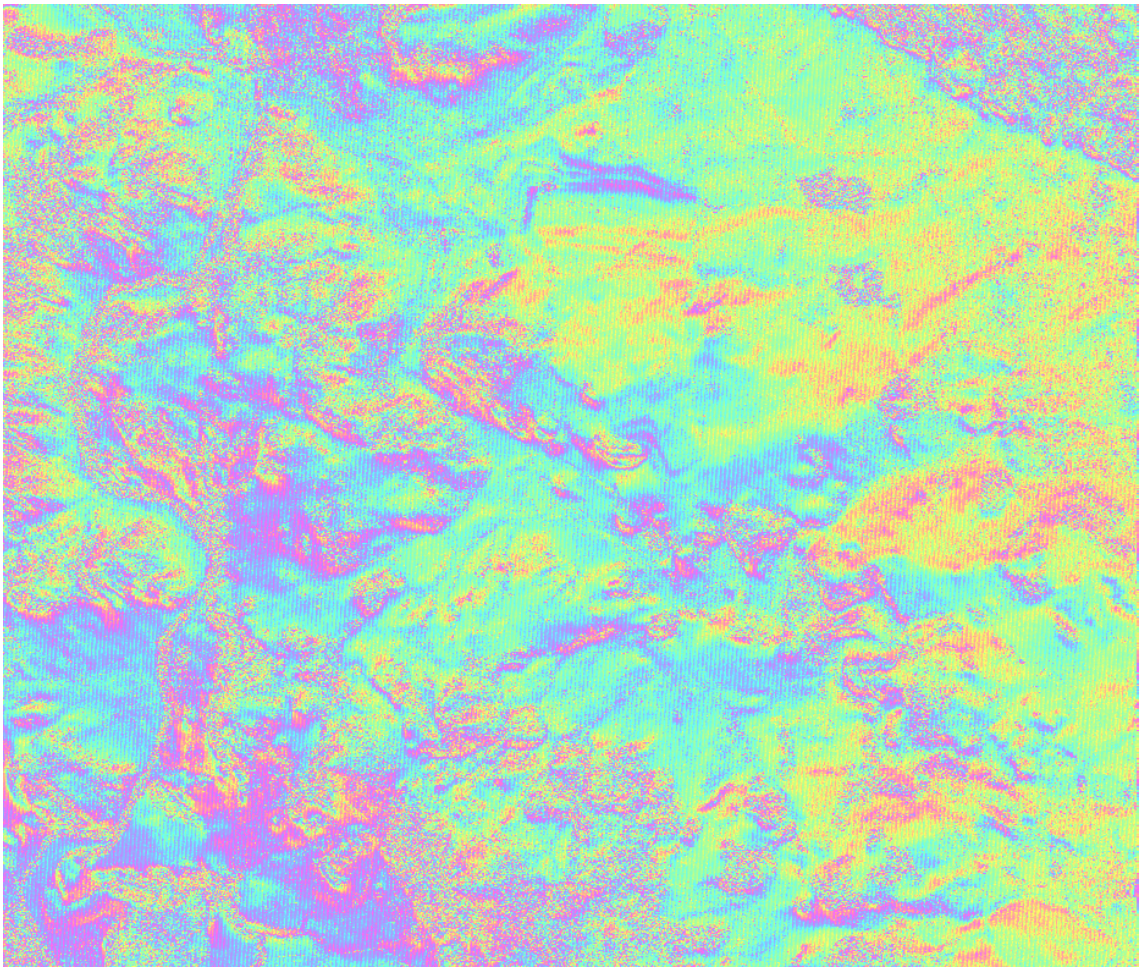
Po zavedení oprav časování hlavního radarového obrazu do jeho .log souboru v řádcích: *First_pixel_azimuth_time (UTC):* a *Range_time_to_first_pixel (2way) (ms):* a vynulování řádku *SRD_OFFSET* v dávce *doris7.in* byly opět postupně spuštěny všechny dávky *doris2.in*, *doris4.in* a *doris7.in* obsahující kroky (1.) až (15.)

Výsledný soubor byl graficky zobrazen (viz. obr. 8.6) a jeho jednolitost barev porovnána s jednolitostí *subtracted.raw* (viz. obr. 8.5). Na základě úsudku o odpovídající si jednolitosti barev byly v tabulce 8.5 zaznamenány výsledné hodnoty časů ve směru azimutu a range hlavních radarových obrazů.

Opravené časy ve směru azimutu a range jsou uvedeny v .log souborech jednotlivých hlavních radarových obrazů, které jsou uloženy na přiloženém CD.

Hodnoty	**Skupina dat**	**Tandem pár**		**Výsledný čas hlavního obrazu ve směru**	
		hlavní obraz	**vedlejší obraz**	**azimutu** $[h]$	**range** $[ms]$
původní	1	23795	43468	10:00:46,893	5,5597550
opravené				10:00:46,883	5,5598077
původní	2	23428	3755	10:00:55,675	5,5643960
opravené				10:00:55,681	5,5639214
původní	3	4986	24659	09:58:02,735	5,5642037
opravené				09:58:02,725	5,5642564
původní	4	5487	25160	09:58:07,110	5,5643960
opravené				09:58:07,120	5,5642108

Tabulka 8.5: Výsledné hodnoty opravených časů ve směru azimutu a range hlavních radarových obrazů.



Obrázek 8.6: Grafické zobrazení barevně jednolitého výstupu po provedení kroků (1.) až (15.) za předpokladu opraveného časování hlavního radarového obrazu. Platí pro tandem pár ze skupiny dat č. 1.

8.2 Oprava časování vedlejšího radarového obrazu

Tato kapitola pojednává o způsobu opravy časování vedlejších radarových obrazů.

8.2.1 Zpracovávaná data

Celkem byly zpracovány čtyři skupiny dat. Přehled zpracovaných radarových obrazů obsahuje tabulka 8.6.

Skupina dat	Typ obrazu	Číslo obrazu	Datum akvizice	Název družice	Vzdálenost od začátku základny [m]	Poznámka
1	hlavní	23795	1999-11-08	ERS-2	0	již opravený
1	vedlejší	5759	1996-05-27	ERS-2	224	časy opraveny
1	vedlejší	25432	1996-05-26	ERS-1	120	viz. poznámka
1	vedlejší	9767	1997-03-03	ERS-2	66	časy opraveny
1	vedlejší	11771	1997-07-21	ERS-2	40	časy opraveny
1	vedlejší	12773	1997-09-29	ERS-2	57	časy opraveny
1	vedlejší	14777	1998-02-16	ERS-2	-3	časy opraveny
1	vedlejší	15278	1998-03-23	ERS-2	5	časy opraveny
1	vedlejší	17282	1998-08-10	ERS-2	49	časy opraveny
1	vedlejší	23294	1999-10-04	ERS-2	4	časy opraveny
1	vedlejší	43468	1999-11-07	ERS-1	-160	časy opraveny
1	vedlejší	26300	2000-05-01	ERS-2	53	časy opraveny
1	vedlejší	35819	2002-02-05	ERS-2	220	časy opraveny
1	vedlejší	42332	2003-05-26	ERS-2	48	viz. poznámka
1	vedlejší	47342	2004-05-10	ERS-2	80	Časy opraveny
2	hlavní	23428	1996-01-07	ERS-1	0	již opravený
2	vedlejší	3755	1996-01-08	ERS-2	-69	časy opraveny
2	vedlejší	24430	1996-03-17	ERS-1	77	časy opraveny
2	vedlejší	4757	1996-03-18	ERS-2	100	časy opraveny
2	vedlejší	25933	1996-06-30	ERS-1	6	časy opraveny
2	vedlejší	9266	1997-01-27	ERS-2	26	časy opraveny
2	vedlejší	10268	1997-04-07	ERS-2	254	časy opraveny
2	vedlejší	15779	1998-04-27	ERS-2	91	viz. poznámka
2	vedlejší	16280	1998-06-01	ERS-2	155	časy opraveny
2	vedlejší	40963	1999-05-16	ERS-1	107	časy opraveny
2	vedlejší	28304	2000-09-18	ERS-2	130	časy opraveny
2	vedlejší	29306	2000-11-27	ERS-2	171	časy opraveny
2	vedlejší	31811	2001-05-21	ERS-2	81	časy opraveny
3	hlavní	4986	1996-04-03	ERS-2	0	již opravený
3	vedlejší	24659	1996-04-02	ERS-1	83	časy opraveny

3	vedlejší	5988	1996-06-12	ERS-2	-46	časy opraveny
3	vedlejší	25661	1996-06-11	ERS-1	48	časy opraveny
3	vedlejší	10497	1997-04-23	ERS-2	102	časy opraveny
3	vedlejší	31673	1997-08-05	ERS-1	40	časy opraveny
3	vedlejší	20517	1999-03-24	ERS-2	98	časy opraveny
3	vedlejší	22020	1999-07-07	ERS-2	-51	časy opraveny
3	vedlejší	23523	1999-10-20	ERS-2	-61	časy opraveny
3	vedlejší	27531	2000-07-26	ERS-2	-4	časy opraveny
3	vedlejší	43062	2003-07-16	ERS-2	182	viz. poznámka
3	vedlejší	45567	2004-01-07	ERS-2	-17	časy opraveny
3	vedlejší	48573	2004-08-04	ERS-2	158	časy opraveny
4	hlavní	5487	1996-05-08	ERS-2	0	již opravený
4	vedlejší	25160	1996-05-07	ERS-1	103	časy opraveny
4	vedlejší	26162	1996-07-16	ERS-1	-56	časy opraveny
4	vedlejší	12501	1997-09-10	ERS-2	-137	viz. poznámka
4	vedlejší	13503	1997-11-19	ERS-2	-182	časy opraveny
4	vedlejší	24525	1999-12-29	ERS-2	-196	časy opraveny
4	vedlejší	26028	2000-04-12	ERS-2	-160	časy opraveny
4	vedlejší	28032	2000-08-30	ERS-2	-134	časy opraveny
4	vedlejší	29034	2000-11-08	ERS-2	-79	časy opraveny
4	vedlejší	35547	2002-02-06	ERS-2	-86	časy opraveny
4	vedlejší	43563	2003-08-20	ERS-2	-91	viz. poznámka
4	vedlejší	49074	2004-09-08	ERS-2	-220	časy opraveny

Tabulka 8.6: Přehled zpracovaných vedlejších radrových obrazů skupin dat 1 až 4. Hlavní radarové obrazy jsou rovněž uvedeny. Poznámka: Tandem páry č. 23795-25432, 23795-42332, 23428-15779, 4986-43062, 5487-12501 a 5487-43563 obsahují chybu, kterou nejsme schopni vyřešit. Z tohoto důvodu byly radarové obrazy č. 25432, 42332, 15779, 43062, 12501 a 43563 z dalšího zpracování vyloučeny.

8.2.2 Postup zpracování radarových dat

Vzhledem k velikosti vstupních radarových obrazů byly nejprve pořízeny výřezy všech vedlejších radarových obrazů. Po provedení výřezu byla pro hlavní a vedlejší radarový obraz zvlášť spuštěna dávka *doris2.in*, která obsahovala kroky:

(1.) *coarseorb* - vypočte offset radarových obrazů z přesných orbit družic

(2.) *coarsecorr* - vypočte offset radarových obrazů z magnitudy obrazu na základě přibližné znalosti hodnoty tohoto offsetu

Z výstupního souboru *interf.log* byly zjištěny hodnoty na řádcích:

Coarse_orbits_translation_lines: *132*
Coarse_orbits_translation_pixels: *-96*
a
Coarse_correlation_translation_lines: *150*
Coarse_correlation_translation_pixels: *-98*

Uvedené hodnoty jsou platné pro pár radarových obrazů č. 23795 - 5759.

Rozdíl hodnot řádků *Coarse_orbits_translation_lines:* a *Coarse_correlation_translation_lines:* je hodnotou Δp_a, která byla následně dosazena do vzorce (5.8), a tím vypočtena oprava časování ve směru azimutu Δt. Rozdíl hodnot řádků *Coarse_orbits_translation_ pixels:* a *Coarse_correlation_translation_ pixels:* je hodntou Δp_r, která byla následně dosazena do vzorce (5.9), a tím vypočtena oprava časování ve směru range $\Delta \tau$. V .log souboru příslušného vedlejšího radarového obrazu byly k původním časům na řádcích:

First_pixel_azimuth_time (UTC): *27-MAY-1996 10:00:57.6406*
Range_time_to_first_pixel (2way) (ms): *5.564501472*

připočteny opravy Δt a $\Delta \tau$ a následně opět spuštěna dávka *doris2.in*, která obsahovala kroky (1.) *coarseorb* a (2.) *coarsecorr*.

Tento postup byl opakován do té doby, než byly získány ve výstupním souboru *interf.log* shodné hodnoty v řádcích:

Coarse_orbits_translation_lines: *150*
Coarse_orbits_translation_pixels: *-98*
a
Coarse_correlation_translation_lines: *150*
Coarse_correlation_translation_pixels: *-98*

Uvedené hodnoty jsou platné pro pár radarových obrazů č. 23795 - 5759.

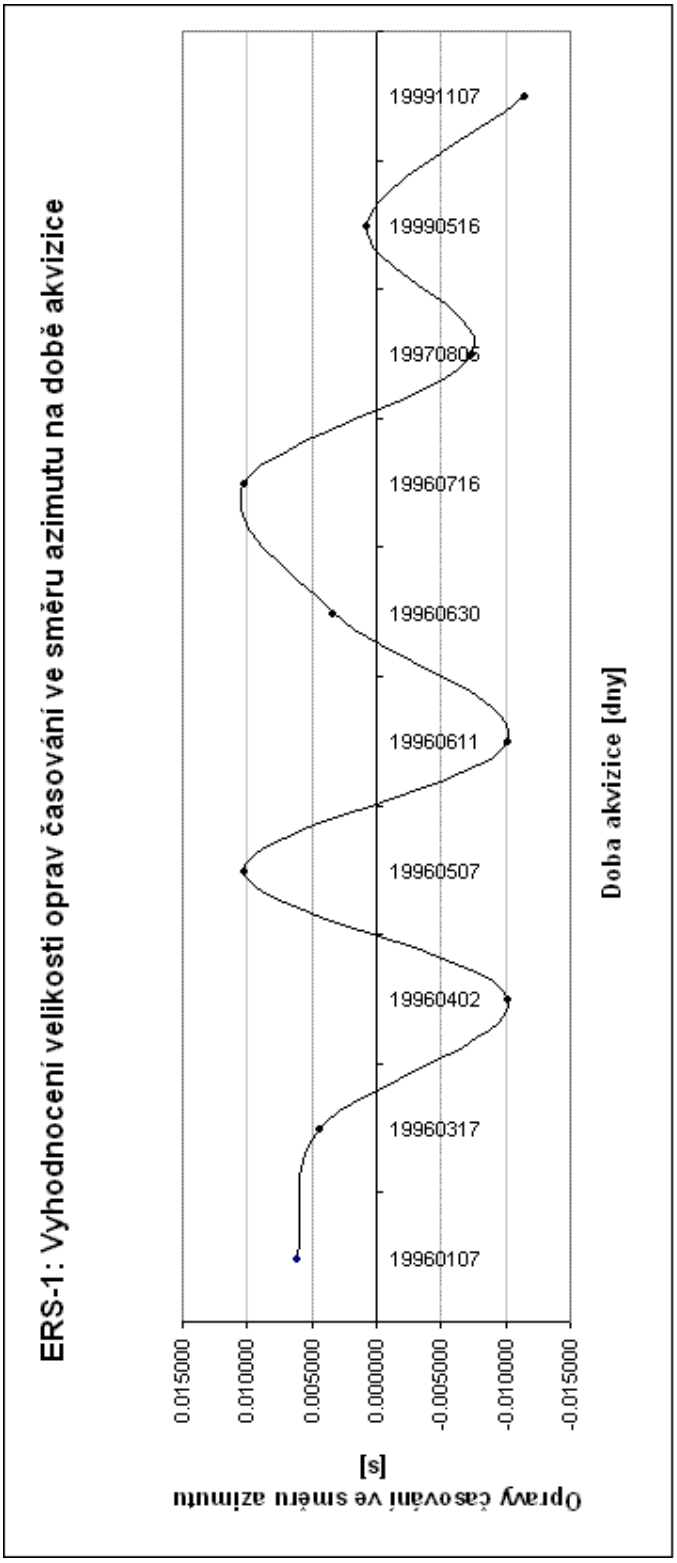
Výsledkem tohoto postupu jsou opravené časy ve směru azimutu a range vedlejších radarových obrazů. Opravené časy ve směru azimutu a range jsou uvedeny v .log souborech jednotlivých vedlejších radarových obrazů, které jsou uloženy na přiloženém CD.

8.3 Vyhodnocení velikosti oprav časování

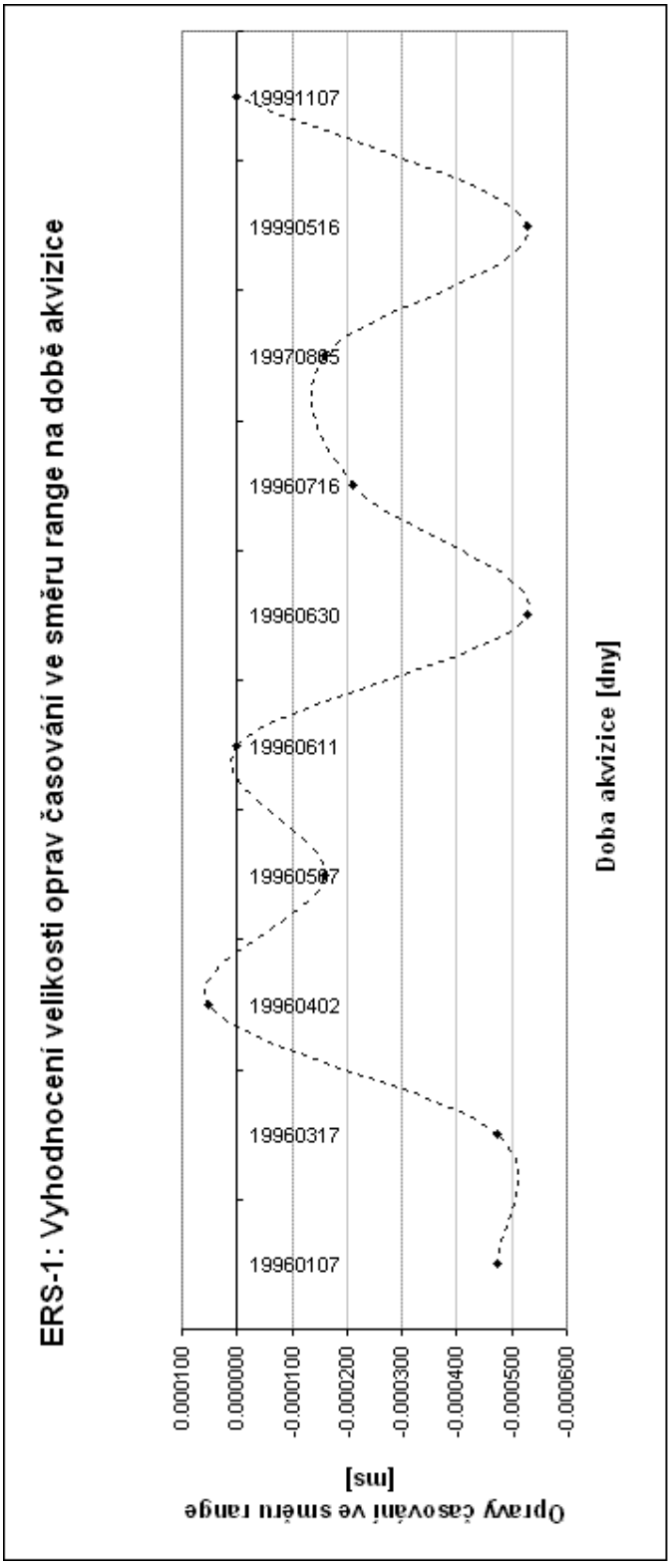
Postupem zpracování radarových dat uvedeným v kapitole 8.1 a 8.2 bylo opraveno časování ve směru azimutu a ve směru range radarových obrazů. S cílem zjistit určitou pravidelnost nebo posloupnost hodnot oprav časování v závislosti na použité družici a době akvizice, byly vypočtené hodnoty znázorněny v podobě grafů 8.1 až 8.6.

Graf 8.1 resp. 8.4 zachycuje velikost oprav časování ve směru azimutu v závislosti na době akvizice pro ERS-1 resp. ERS-2. Srovnáme-li grafy 8.1 a 8.4, lze konstatovat, že jsou hodnoty oprav časování ve směru azimutu pro ERS-1 a ERS-2 řádově stejné. Ten samý závěr platí i pro hodnoty oprav časování ve směru range znázorněné v grafech 8.2 a 8.5.

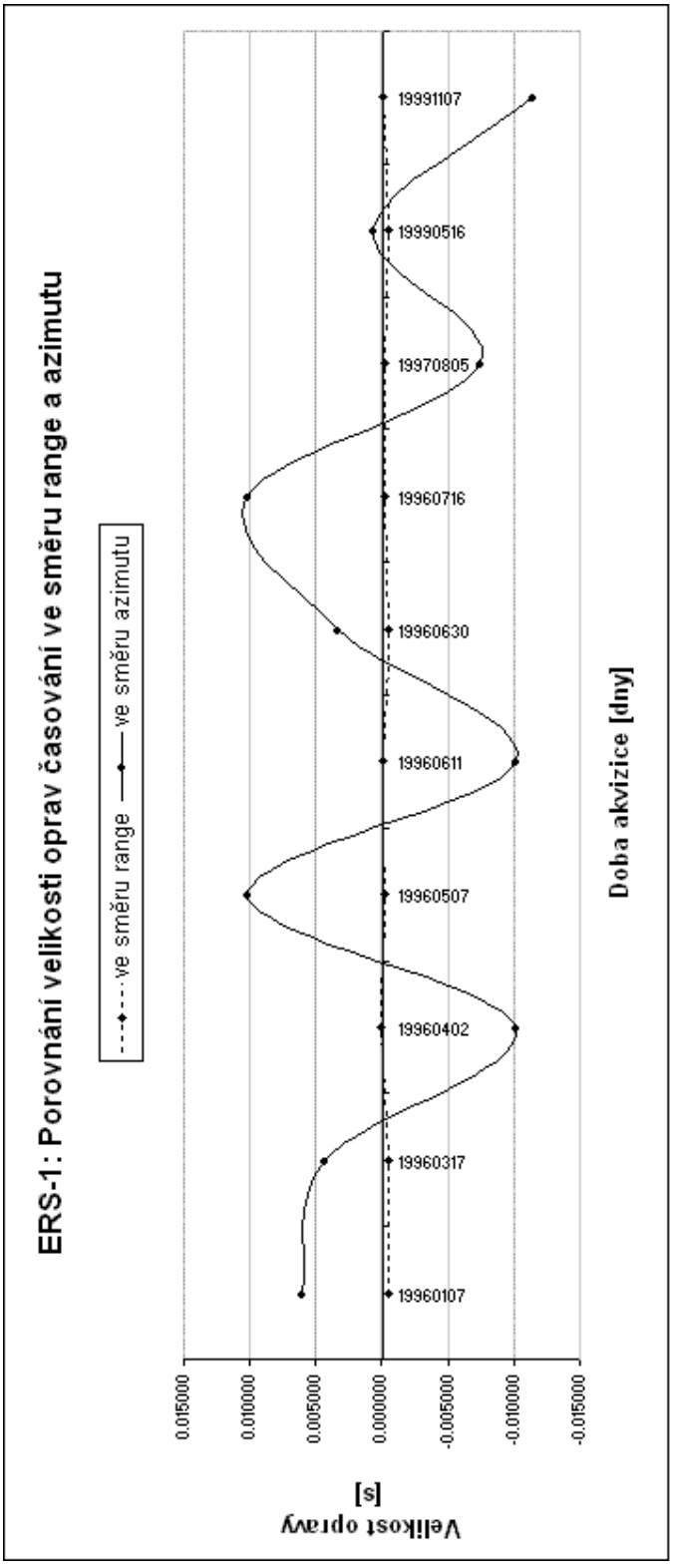
Z grafů 8.3 a 8.6 lze jednoznačně vyčíst, že je velikost oprav časování ve směru azimutu mnohonásobně větší než velikost oprav časování ve směru range.



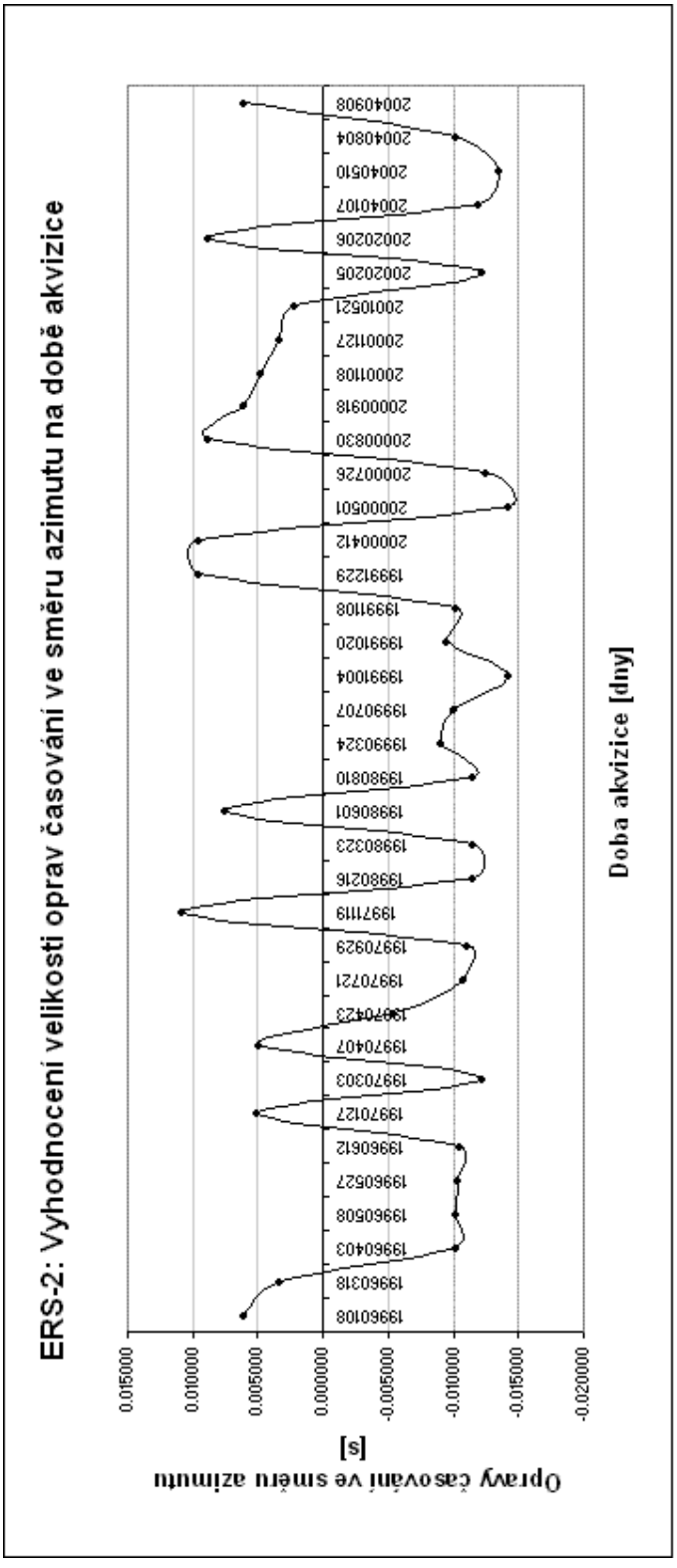
Graf 8.1: Vyhodnocení velikosti oprav časování ve směru azimutu na době akvizice pro ERS-1.



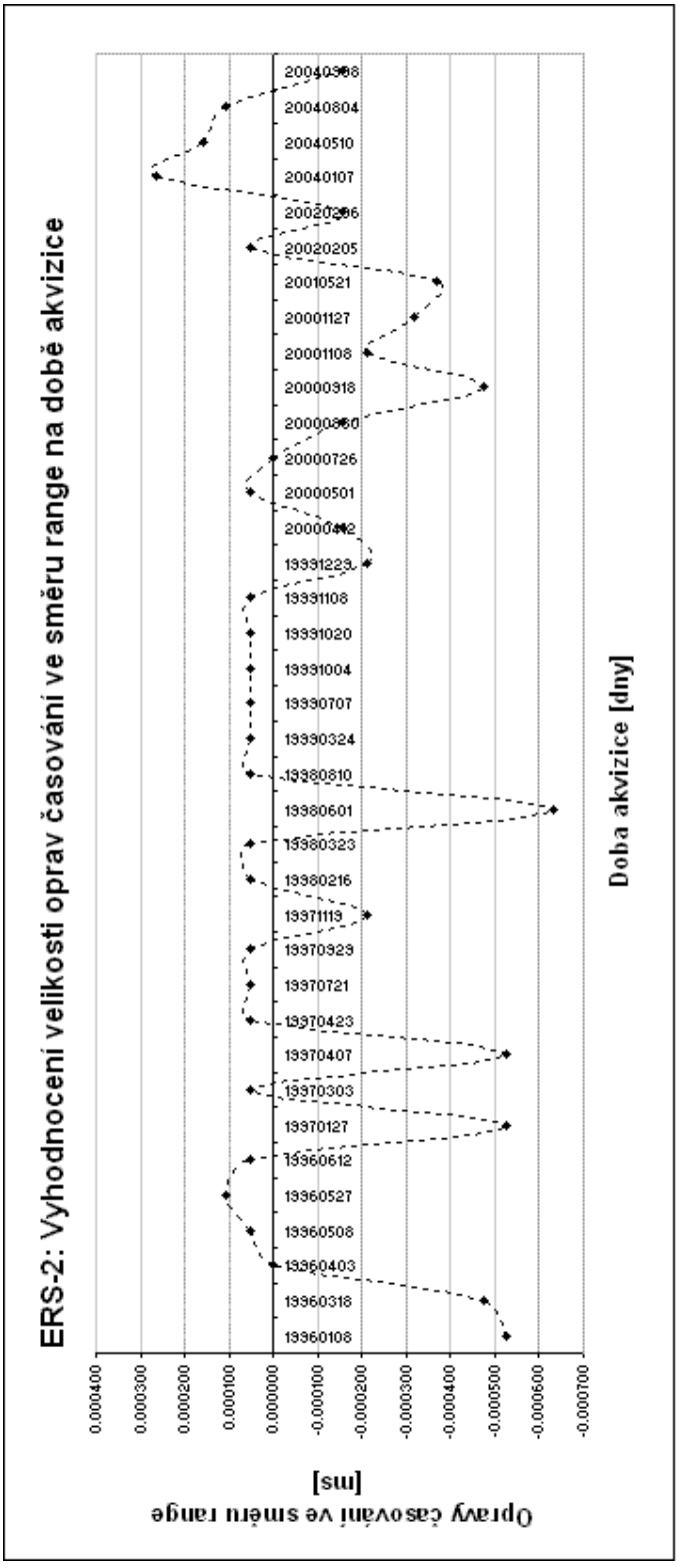
Graf 8.2: Vyhodnocení velikosti oprav časování ve směru range na době akvizice pro ERS-1.



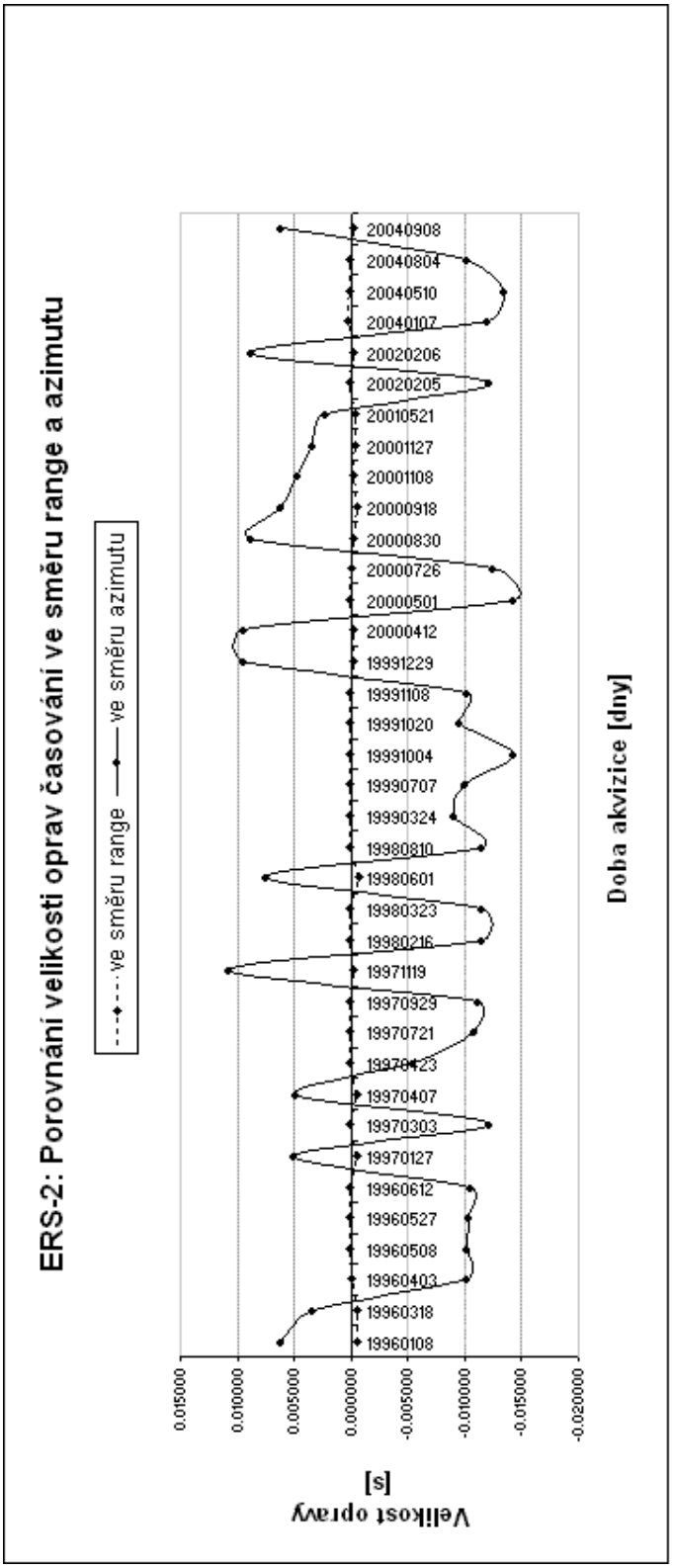
Graf 8.3: Porovnání velikostí oprav časování ve směru range a azimutu na době akvizice pro ERS-1.



Graf 8.4: Vyhodnocení velikosti oprav časování ve směru azimutu na době akvizice pro ERS-2.



Graf 8.5: Vyhodnocení velikost oprav časování ve směru range na době akvizice pro ERS-2.



Graf 8.6: Porovnání velikostí oprav časování ve směru range a azimutu na době akvizice pro ERS-2.

8.4 Georeferencování tandem páru

Poslední praktický krok této diplomové práce spočívá v provedení georeferencování jednoho tandem páru a následných výpočtů vedoucích k získání:

- **hodnocení výpočtu oprav časování ve směru azimutu a range,**
- **hodnocení přesnosti Dopplerova centroidu a přesnosti oscilátorů, které udávají vzorkovací frekvenci a frekvenci vysílaných pulsů (PRF).**

8.4.1 Zpracovávaná data

Georeferencování bylo provedeno s tandem párem 23795-43468, uvedeným v tabulce 8.1.

8.4.2 Postup zpracování radarových dat

Vlivem chyb v radarových datech (viz kap. 5.2) dochází k deformaci georeferencovaného radarového obrazu vůči skutečnosti. Dle kapitoly 6.2 lze tuto deformaci vyhodnotit pomocí určení parametrů: posun ve směru osy X, posun ve směru osy Y, natočení okolo osy X, natočení okolo osy Y, měřítkový koeficient ve směru osy X a měřítkový koeficient ve směru osy Y. Tato diplomové práce si neklade zacíl získat zmíněné parametry, ale určit správnost vypočtených oprav časování ve směru azimutu a range a dále zjistit, zda je přesnost Dopplerova centroidu a oscilátorů dostačující.

Za účelem získání těchto informací byl určen následující postup zpracování radarových obrazů.

Opravené časování ve směru azimutu a range radarových obrazů č. 23795 a č. 43468 (vypočteno v kapitolách 8.1 a 8.2) bylo nejprve zavedeno jejich do .log souborů.

S cílem georeferencovat tandem pár radarových obrazů byly v software DORIS postupně spuštěny následující dávky:

- **Doris2.in, která spouští příkazy:**

(1.) *coarseorb* - vypočte offset radarových obrazů z přesných orbit družic
(2.) *coarsecorr* - vypočte offset radarových obrazů z magnitudy obrazu na základě přibližné znalosti hodnoty tohoto offsetu
(3.) *m_filtazi* - provede filtraci hlavního radarového obrazu ve směru azimutu
(4.) *s_filtazi* - provede filtraci vedlejšího radarového obrazu ve směru azimutu
(5.) *fine* - provede jemnou koregistraci, vychází z dat *coarsecorr*
(6.) *coregpm* - proloží ofsetty z předešlého kroku *fine* polynomem druhého stupně

- **Doris4.in, která spouští příkazy:**

(7.) *resample* - provede převzorkování vedlejšího radarového obrazu na hlavní
(8.) *filtrange* - provede filtraci obou radarových obrazů v range směru - provede odříznutí nepřekrývajících se částí spektra
(9.) *interfero* - odečte fáze obou radarových obrazů – vypočte interferogram
(10.) *comprefpha* - vypočte „flat-Earth fázi“
(11.) *subtrrefpha* - odečte „flat-Earth fázi“ od interferogramu
(12.) *coherence* - spočte koherenci nebo-li spolehlivost interferogramu
(13.) *filtphase* - vyfiltruje fázi s cílem snížení šumu

- **Doris7.in, která spouští příkaz:**

(14.) *comprefdem* - vypočte fázi odpovídající danému DMT tedy konvertuje DMT do systému radaru

Po dokončení uvedených kroků byl nejprve zmultilookován soubor *tandem.sub*. Tyto změny bylo nutno zapsat do souboru *interf.log* v kroku (11.) *subtrrefpha*.

Poslední krokem zpracování v software DORIS bylo spuštění dávky doris7.in, kroku:

(17.) *slant2h* - vypočítá zeměpisnou šířku, délku a výšku pro každý pixel

Výstupními soubory jsou *phi.raw* (soubor obsahuje zeměpisnou šířku každého obrazového bodu) a *lambda.raw* (soubor obsahuje zeměpisnou délku každého obrazového bodu).

Afinní transformaci (odvozenou v kap. 6.2), tedy převod dat ze souřadnicového systému radarového obrazu do referenčního souřadnicového systému, je možno provést na zákaldě známých souřadnic minimálně tří identických bodů v obou souřadnicových systémech. Celkem bylo určeno 40 identických bodů, tedy nadbytečné množství identických bodů. Referenčním souřadnicovým systémem byla zvolena internetová mapa portálu MAPY.cz [20] (dále jako souřadnicový systém mapy), protože umožňuje odečítání GPS souřadnic.

Nejprve však bylo nutno zajistit souřadnice identických bodů v obou souřadnicových systémech a následně je převést do souřadnicového systému S-JTSK:

- **Identické body odečtené z radarového obrazu**

  Z graficky zobrazeného interferogramu byly nejprve odečteny souřadnice identických bodů v systému (řádek, pixel). V software MATLAB byl v podobě matice načten soubor *phi.raw* resp. *lambda.raw* a vyvoláním jednotlivých identických bodů v systému (řádek, pixel) byly získány zeměpisné šířky resp. zeměpisné délky všech identických bodů. Pomocí software MATKART byly tyto zeměpisné šířky a zeměpisné délky všech identických bodů převedeny do souřadnicového systému S-JTSK.

- **Identické body odečtené z mapy**

  Zeměpisné šířky a zeměpisné délky identických bodů odečtených z mapy byly rovněž použitím software MATKART převedeny do souřadnicového systému S-JTSK.

Souřadnice identických bodů v souřadnicovém systému WGS-84 a v souřadnicovém systému S-JTSK jsou uvedeny v tabulce 8.7.

ID	WGS-84												S-JTSK			
	Souř. systém rad. obrazu						Souř. systém mapy						Souř. systém rad. obrazu		Souř. systém mapy	
	zem. šířka [° ′ ″]			zem. délka [° ′ ″]			zem. šířka [° ′ ″]			zem. délka [° ′ ″]			y [m]	x [m]	Y [m]	X [m]
1	50	22	55	13	10	60	50	23	10	13	10	24	-825464	-997846	-826093	-997279
2	50	30	35	13	25	11	50	30	44	13	24	13	-806713	-986345	-807799	-985891
3	50	54	30	13	40	22	50	54	33	13	39	38	-782486	-945114	-783316	-944899
4	50	22	9	13	26	18	50	22	10	13	25	52	-807749	-1001993	-808256	-1001879
5	50	20	56	13	23	32	50	20	42	13	20	54	-811337	-1003734	-814478	-1003695
6	50	33	55	13	32	60	50	33	58	13	32	26	-796670	-981579	-797305	-981409
7	50	54	3	13	32	57	50	54	3	13	31	24	-791211	-944683	-792990	-944386
8	50	33	1	13	35	45	50	33	2	13	35	16	-793694	-983721	-794255	-983623
9	50	29	46	13	28	55	50	29	44	13	28	28	-802581	-988487	-803117	-988452
10	50	38	57	13	48	35	50	39	14	13	47	55	-777107	-975035	-777809	-974419
11	50	31	56	13	36	37	50	31	59	13	36	7	-792979	-985851	-793559	-985669
12	50	59	41	13	51	34	50	59	40	13	51	15	-768106	-937517	-768479	-937500
13	50	58	34	13	53	41	50	58	27	13	53	41	-765962	-939908	-765997	-940145
14	50	57	48	13	55	14	50	57	54	13	56	4	-764360	-941589	-763378	-941541
15	50	38	42	13	46	6	50	38	43	13	45	38	-780075	-975095	-780622	-974968
16	50	42	3	13	57	40	50	42	21	13	56	29	-765708	-970898	-767000	-970134
17	50	55	39	14	7	12	50	55	39	14	6	54	-751043	-947506	-751395	-947467
18	50	57	11	13	59	14	50	57	9	13	59	1	-759885	-943391	-760157	-943403
19	50	36	50	13	47	11	50	36	51	13	46	38	-779309	-978704	-779942	-978559
20	50	42	4	13	58	0	50	42	4	13	57	24	-765297	-970912	-766007	-970811
21	50	37	46	13	45	28	50	37	55	13	44	5	-781067	-976693	-782644	-976190
22	50	37	37	14	3	35	50	37	37	14	3	17	-759971	-980012	-760309	-979962
23	50	22	47	13	45	52	50	22	47	13	45	27	-784627	-1004253	-785113	-1004179
24	50	54	41	14	10	22	50	54	40	14	10	3	-747632	-949808	-747998	-949779
25	50	21	53	13	44	10	50	21	53	13	43	46	-786861	-1005611	-787331	-1005540
26	50	39	6	13	52	60	50	39	23	13	52	28	-771932	-975518	-772470	-974924
27	50	39	47	13	53	53	50	39	53	13	53	26	-770707	-974414	-771214	-974160
28	50	39	22	14	2	55	50	39	22	14	2	38	-760290	-976686	-760607	-976658
29	50	55	22	14	8	9	50	55	22	14	7	53	-750023	-948178	-750328	-948138
30	50	31	45	14	8	30	50	31	46	14	8	5	-755750	-991599	-756224	-991494
31	50	39	38	14	3	29	50	39	37	14	3	13	-759556	-976296	-759873	-976282
32	50	32	39	14	3	48	50	32	40	14	3	23	-761018	-989166	-761502	-989075
33	50	31	21	14	6	20	50	31	23	14	5	55	-758382	-991979	-758864	-991849
34	50	31	2	14	3	58	50	31	6	14	3	31	-761238	-992169	-761743	-991972
35	50	39	39	14	5	10	50	39	40	14	4	5	-757587	-976565	-758847	-976341
36	50	40	38	14	7	46	50	40	38	14	7	25	-754299	-975178	-754708	-975124
37	50	30	59	14	5	12	50	30	59	14	4	52	-759799	-992475	-760192	-992416
38	50	36	4	14	10	31	50	44	19	13	13	36	-752268	-984014	-816388	-959110
39	50	47	17	14	13	48	50	47	19	14	13	34	-745547	-963964	-745802	-963866
40	50	52	24	14	14	35	50	52	27	14	14	7	-743325	-954704	-743847	-954517

Tabulka 8.7: Souřadnice identických bodů v souřadnicovém systému WGS-84 a S-JTSK.

Výpočet afinní transformace byl proveden v software MATLAB a v software GROMA s tím, že byly vyloučeny identické body č. 2, 3, 5, 7, 14, 16, 21, 35 a 38. Důvodem vylouční těchto identických bodů byly velké souřadnicové rozdíly způsobené nepřesným odečtením bodů z mapy nebo radarového obrazu. Přehled souřadnicových rozdílů zobrazuje tabulka 8.8.

Výsledné prvky vektoru *h* po provedení afinní transformace v software MATLAB a v software GROMA jsou uvedeny v tabulce 8.9.

Prvky vektoru *h*	**MATLAB**	**GROMA**
a	0.998458	0.998458
b	-0.002371	-0.002371
c	0.002556	0.002556
d	1.002512	1.002512
$\mathbf{X_0}$	-3202 m	-130 m
$\mathbf{Y_0}$	3972 m	459 m

Tabulka 8.9: Tabulka výsledných hodnot po provedení afinní transformace v software MATLAB a GROMA.

Hodnoty prvků vektoru $h(a, b, c, \text{a } d)$ se v obou případech (software MATLAB i GROMA) shodují. Po provedení afinní transformace v software MATLAB bylo ale zjištěno, že vypočtené posuny (posun ve směru X = -3202 m, posun ve směru Y = 3972 m) jsou v jiném řádu než je průměrný souřadnicový rozdíl identických bodů (průměrný souřadnicový rozdíl v X = -126 m, průměrný souřadnicový rozdíl v Y = 445m). Naopak řád posunů vypočtených pomocí software GROMA (posun ve směru X = -130 m, posun ve směru Y = 459 m) odpovídá řádu souřadnicových rozdílů identických bodů (průměrný souřadnicový rozdíl v X = -126 m, průměrný souřadnicový rozdíl v Y = 445m). Vznikla tak domněnka, že software MATLAB počítá afinní transformaci jinak než software GROMA. Logicky není totiž možné, aby byl jeden souřadnicový systém posunut o více než 3000 metrů v obou směrech, když se souřadnicové rozdíly identických bodů pohybují v řádu stovek metrů. Proto bylo dále pracováno jen s vektorem h, který byl získán na zákaldě výpočtu pomocí software GROMA.

ID	S-JTSK					
	Souř. systém rad. obrazu		Souř. systém mapy		souř. rozdíl	souř. rozdíl
	y	x	Y	X	ΔY	ΔY
1	-825464	-997846	-826093	-997279	-629.1	566.9
2	-806713	-986345	-807799	-985891	-1086.8	454.2
3	-782486	-945114	-783316	-944899	-829.9	214.6
4	-807749	-1001993	-808256	-1001879	-506.9	114.1
5	-811337	-1003734	-814478	-1003695	-3140.7	38.8
6	-796670	-981579	-797305	-981409	-635.3	169.7
7	-791211	-944683	-792990	-944386	-1778.8	296.2
8	-793694	-983721	-794255	-983623	-561.7	97.4
9	-802581	-988487	-803117	-988452	-536.3	34.8
10	-777107	-975035	-777809	-974419	-702.2	615.6
11	-792979	-985851	-793559	-985669	-580.1	182.8
12	-768106	-937517	-768479	-937500	-372.5	17.3
13	-765962	-939908	-765997	-940145	-34.5	-237.6
14	-764360	-941589	-763378	-941541	982.5	48.1
15	-780075	-975095	-780622	-974968	-546.8	127.9
16	-765708	-970898	-767000	-970134	-1291.6	764.1
17	-751043	-947506	-751395	-947467	-352.3	39
18	-759885	-943391	-760157	-943403	-272.1	-11.8
19	-779309	-978704	-779942	-978559	-632.9	144.5
20	-765297	-970912	-766007	-970811	-710.1	100.9
21	-781067	-976693	-782644	-976190	-1577	502.6
22	-759971	-980012	-760309	-979962	-337.8	50.7
23	-784627	-1004253	-785113	-1004179	-486.4	73.8
24	-747632	-949808	-747998	-949779	-366	29.2
25	-786861	-1005611	-787331	-1005540	-470.1	71.6
26	-771932	-975518	-772470	-974924	-538.8	593.6
27	-770707	-974414	-771214	-974160	-507.3	253.3
28	-760290	-976686	-760607	-976658	-316.6	28.3
29	-750023	-948178	-750328	-948138	-305	40.7
30	-755750	-991599	-756224	-991494	-473.7	105.7
31	-759556	-976296	-759873	-976282	-317.2	14.7
32	-761018	-989166	-761502	-989075	-484.1	91.8
33	-758382	-991979	-758864	-991849	-482.3	130
34	-761238	-992169	-761743	-991972	-504.5	196.8
35	-757587	-976565	-758847	-976341	-1259.4	223.8
36	-754299	-975178	-754708	-975124	-408.6	54.1
37	-759799	-992475	-760192	-992416	-393.5	58.1
38	-752268	-984014	-816388	-959110	-64120.3	24904.1
39	-745547	-963964	-745802	-963866	-255.5	97.9
40	-743325	-954704	-743847	-954517	-521.7	187.2

Tabulka 8.8: Tabulka souřadnicových rozdílů identických bodů v souřadnicovém systému S-JTSK.

Přesnosti jednotlivých prvků vektoru $h(a, b, c,$ a $d)$ určených výpočtem afinní transformace v software MATLAB byly vypočteny na základě vzorců (6.16) až (6.22). Přesnost prvku X_0 resp. Y_0 je charakterizována hodnotou své směrodatné odchylky. Tabulka 8.10 uvádí přesnosti jednotlivých prvků vektoru h.

Přesnost prvků vektoru *h*	**hodnota**
m_a	0.001655
m_b	0.001599
m_c	0.001655
m_d	0.001599
m_{X_0}	146 m
m_{Y_0}	176 m

Tabulka 8.10: Přehled přesností jednotlivých prvků vektoru *h*.

Nyní sjednotíme tabulku 8.9 a 8.10 do jedné (viz. tab. 8.11) tak, aby bylo možno učinit patřičné závěry.

Prvky vektoru *h*	**hodnota**	**Přesnost prvků vektoru *h***	**hodnota**
a	0.998458	m_a	0.001655
b	-0.002371	m_b	0.001599
c	0.002556	m_c	0.001655
d	1.002512	m_d	0.001599
X_0	-130 m	m_{X_0}	176 m
Y_0	459 m	m_{Y_0}	146 m

Tabulka 8.11: Tabulka hodnot prvků vektoru *h* a jejich přesnost.

- **Hodnocení výpočtu oprav časování ve směru azimutu a range.**

  Vzhledem k hodnotě posunu ve směru osy X a své přesnosti lze konstatovat, že bylo časování ve směru azimutu opraveno správně. Hodnota posunu ve směru osy Y a hodnota přesnosti posunu naznačují, že by mohlo při opravě časování dojít k chybě.

- **Hodnocení přesnosti Dopplerova centroidu a přesnosti oscilátorů, které udávají vzorkovací frekvenci a frekvenci vysílaných pulsů (PRF).**

Definujme si nulovou a alternativní hypotézu:

Nulová hypotéza (0): Hodnota Dopplerova centroidu a přesnost oscilátorů byla určena správně.

Alternativní hypotéza (A): Transformační matice $T = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ je jednotková.

Na základě předešlých výpočtů je transformační matice:

$$T = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.998458 & -0.002371 \\ 0.002556 & 1.002512 \end{pmatrix} \tag{8.1}$$

S uvážením velikostí hodnot přesností jednotlivých parametrů (a, b, c, a d) uvedených v tab. 8.11 můžeme konstatovat, že je transformační matice T jednotková. Z toho plyne, že nulovou hypotézu (0) nemůžeme na základě provedených výpočtů popřít. Výsledkem výpočtů je tedy konstatování, že hodnota Dopplerova centroidu byla určena správně a přesnost oscilátorů taktéž.

Závěr

Tato diplomová práce je první studií zaměřenou na vyhodnocení chyb v začátku měření radarových obrazů, které byly na přelomu roku 2005/2006 dodány na katedru mapování a kartografie, ČVUT Praha. Radarová data dodala Evropská kosmická agentura. Předmětem zpracování bylo celkem 53 radarových obrazů ve čtyřech skupinách radarových dat. Toto relativně velké množství dat bylo nutno zpracovat s vidinou jistého cíle, a to opravit časování v začátku měření ve směru azimutu a ve směru range tak, aby mohla být radarová data dále zpracována.

Teoretická část diplomové práce obsahuje přehled základů radarové interferometrie, důležitá fakta o družicích a možnostech využití SAR interferometrie. Praktická část je věnována postupu zpracování radarových dat, který byl navržen tak, aby efektivně zajistil opravení časování v začátku měření radarových dat. Významná část práce je rovněž věnována georeferencování, s cílem ukázat způsob kontroly již opravených radarových obrazů.

Z 53 radarových obrazů bylo úspěšně opraveno časování v začátku měření ve směru azimutu a range u 47 radarových obrazů. Výsledné .log soubory radarových obrazů s opraveným časováním jsou uloženy na přiloženém CD. Tandem páry č. 23795-25432, 23795-42332, 23428-15779, 4986-43062, 5487-12501 a 5487-43563 obsahují chybu, proto byly radarové obrazy č. 25432, 42332, 15779, 43062, 12501 a 43563 z dalšího zpracování vyloučeny. Vyhodnocení velikosti oprav časování v závislosti na použité družici a době akvizice potvrdilo domněnku, že jsou opravy časování ve směru range několikrát menší než opravy časování ve směru azimutu.

Georeferencování jednoho tandem páru a následné zjištění kvality určení oprav časování proběhlo úspěšně. Zároveň bylo dokázáno, že je Dopplerův centroid určen dostatečně přesně tak, že se jeho nepřesnost neprojeví ve výpočtu georeferencování. Dále paltí, že přesnost oscilátorů, které udávají vzorkovací frekvenci a frekvenci vysílaných pulsů je rovněž dostatečná, aby se neprojevila ve výpočtu georeferencování.

Problematika zpracování radarových dat je v České republice bezesporu moderním, ale zatím málo prakticky využívaným odvětvím dálkového průzkumu Země. Věřím, že má snaha položit teoretické základy výpočtu oprav časování v začátku měření radarových dat v českém jazyce přispěje k rozvoji radarové interferometrie právě zde, v České republice.

Jako velmi pozitivní faktor zpracování této práce spatřuji nutnost nastudovat pro mě zcela nové teorie a fakta, jejichž pochopení však stojí na vědomostních základech získaných v průběhu studia oboru Geodezie a kartografie, ČVUT Praha.

Na závěr mi dovolte poděkovat zaměstnancům katedry mapování a kartografie, za možnost podílet se na tomto velmi zajímavém výzkumu, ke kterému z mé strany mohu přispět radarovými daty s opraveným časováním v začátku jejich měření.

Literatura

[1] Prati, C. *Introduction to INSAR*, Politecnico di Milano, 1994.

[2] Hanssen, R. F. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001.

[3] *ESA (European Space Agency)*. http://www.esa.int.

[4] Kampes, B., *User's manual and technical documentation*, Delft Object-oriented Radar Interferometric Software, Delft Institute for Earth-oriented Space Research (DEOS), Delft University of Technology. http://enterprise.lr.tudelft.nl/doris/software/doris_v3.16.pdf.

[5] *Manuál pro Visual MATKART 2004*. http://www.kartografie.ic.cz/matkart.

[6] *MATLAB, The Mathworks*. http://www.mathworks.com/products/matlab.

[7] Kianička, J. *Radar Interferometry used for detection of landslides and subsidences in the Northern Bohemia Brown Coal Basin*, Laboratory of Remote Sensing, Department of Mapping and Cartography, CTU Prague, Faculty of Civil Engineering Czech Republic, 2005.

[8] Madsen, S. N. a Zebker, H. A. Imaging radar interferometry. In Henderson, F. M. and Lewis, A. J., editors, *Principles and applications of Imaging Radar*, *Manual of Remote Sensing*, 6:359–380, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998.

[9] Urban, P. *Detekce polohových změn zemského povrchu radarovou interferometrií*, Katedra mapování a kartografie, České vysoké učení technické v Praze, 2005.

[10] Usai, S. a Klees, R. *SAR Interferometry On Very Long Time Scale: A Study of the Interferometric Characteristics Of Man-Made Features*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 37:2118-2123, 1999.

[11] Peltzer, G. a Rosen, P. *Surface Displacement of the 17 May 1993 Eureka Valley, California Earthquake Observed by SAR Interferometry*, Science, 268:1333-1336, 1995.

[12] Segall, P. a Davis, J. L. (1997), *GPS applications for geodynamics and Earthquake studies.* Earth Planet. Science, 25:301-336.

[13] Massonet, D., Thatcher, W. a Vadon, H. (1996), *Detection of postseismic fault zone collapse following the Landers Earthquake*, Nature, 382:489-497.

[14] Amelung, F., Jónssen, S., Zeber, H. a Segall, P. *Widespread uplift and trap door faulting on Galápagos volcanoes observed with radar interferometry*, Geophysical Research Letters, 27:3093-3097, 2000.

[15] Goldstein, R. M., Engelhardt, H., Kamp, B. a Frolich, R. M. *Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: Application to an Antarctic ice stream*, Science, 262:1525-1530, 1993.

[16] Small, D., Werner, C. a Nuesch, D. *Baseline modeling for ERS-1 SAR interferometry*, In igarss93, 2005.

[17] Bamler, R. a Schattler, B. *SAR data acquisition and image formation*. In Schreier, editor, *SAR Geocoding: data and systems*, strany 53-102. Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1993.

[18] Sansoti, E. *Solution for the interferometric and stereo sar geolocation problem*, IEEE actions on geoscience and remote sensing, 42:1625-1634, 2004.

[19] Čapková, I., *Satelite Orbit Errors and Their Influence on Interfarograms*, Department of Mapping and Cartography, Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University, 2005.

[20] *MAPY.cz*. http://www.mapy.cz.

[21] Čapková, I. *Radarová interferometrie: chyby v georeferencování*, Katedra mapování a kartografie, České vysoké učení technické v Praze, 2005.

[22] *GROMA*. http://www.groma.cz/cz/man.

[23] *ERS instruments*. http://www.deos.tudelft.nl/ers/instruments.html.

[24] *ENVISAT instruments*. http://envisat.esa.int/instruments.

[25] *RADARSAT International*. http://www.radarsat2.info.

[26] *Japanese Earth Resources Satellite*. http://www.eorc.jaxa.jp/JERS-1.