

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



Fakulta stavební, obor Geodézie a kartografie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Oprava orbitálních chyb s pomocí georeferencování intenzitních
radarových snímků

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

Konzultant diplomové práce: Ing. Ivana Hlaváčová, Ph.D.

Prosinec 2009

Bc. Růžena Rezková

Prohlášení

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

V Praze dne 1.12.2009

Rezková Růžena

Poděkování

Za odborné vedení této diplomové práce bych zde ráda poděkovala vedoucí mé diplomové práce doc. Ing. Halounové, CSc. a také konzultantce Ing. Ivaně Hlaváčové, Ph.D.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá drahami družic a jejich chybami. Vstupními daty jsou orbity družice ERS-1 evropské vesmírné agentury ESA. Snímky byly pořízeny v letech 1992, 1993 a 1996. Data vznikla z družicové altimetrie. Chyby drah se projevují posunutím snímků. Tyto snímky jsou porovnány s grafickým znázorněním v programu Google Earth a opraveny.

Data budou po opravě použita pro radarovou interferometrii.

Abstract

This thesis deals with orbits and their errors. As input data orbits acquired by ERS-1 satellites of European Space Agency (ESA) in 1992,1993 and 1996 were used. Data originated from satellite altimetry. The orbit errors are computed from scene shift here. These images are compared with the graphics program Google Earth and corected.

Data will be used for repair of radar interferometry.

Obsah

Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	9
Seznam zkratek	10
1. Úvod	11
2. Radar a použítá data	13
2.1 Charakteristiky radaru a technologie SAR	13
2.2 Družice ERS	14
2.3 Vybavení družice ERS	16
2.4 Použité programy	17
2.4.1 GAMMA	17
2.4.2 Google Earth	17
2.4.3 MicroStation V8	18
3. Družicová altimetrie	19
3.1 Princip altimetrie	20
3.2 Diferenciální altimetrie	21
3.3 Altimetrická měření	22
3.4 Altimetrické korekce	22
3.5 Radiální chyba dráhy	23
3.5.1 Radiální chyba jako funkce sklonu roviny dráhy	23
3.5.2 Radiální chyba jako funkce zeměpisné šířky a délky	24
3.5.3 Korelovaná a variabilní složka pro SSC a DSC	25
3.5.4 Výběr drah altimetrických družic	26
3.5.5 Využití družicové altimetrie	28
3.5.5.1 Oceánografické aplikace	28
3.5.5.2 Gravitační pole Země	30
3.5.5.3 Družicová altimetrie mimo oceány	31
3.5.5.4 Bistatická altimetrie	32

3.5.5.5	Posuny souřadných systémů	33
4	Radarová interferometrie	34
4.1	Princip interferometrie	34
4.2	Výpočet topografické výšky	35
4.3	Rozlišovací schopnost radarového snímkování	37
4.4	Zobrazovací geometrie	38
4.5	Využití radarové interferometrie	39
4.5.1	Topografické mapování	39
4.5.2	Monitorování deformací	40
4.5.3	Tématické mapování	41
4.5.4	Monitorování atmosférického zpoždění	41
4.6	Zpracování družicových snímků	41
4.6.1	Výběr snímků	41
4.6.2	Předzpracování	42
4.6.3	Koregistrace	42
4.6.4	Převzorkování a interpolace	42
4.6.5	Filtrování	43
4.6.6	Tvorba interferogramu	43
4.6.7	Výpočet fáze pro referenční těleso	43
4.6.8	Výpočet koherence	43
4.6.9	Rozbalení fáze	43
4.6.10	Georeferencování	44
4.7	Chyby v datech	45
4.7.1	Projev chyb v datech	45
5	Vlastní zpracování dat	47
5.1	Zpracování ERS dat	48
5.2	Výpočet posunu	49
5.3	Vyhotovení jednotlivých posunů	51
5.4	Zhodnocení	56
7	Závěr	58
	Literatura	60
	Přílohy	

Seznam obrázků

2.1	Dráha družice ERS-1	17
3.1	Princip altimetrie	20
3.2	Ukázka SSC a DSC	21
3.3	Názorná pomůcka k transformaci	24
3.4	Ukázky radiální chyby	26
3.5	Heliosynchronní dráha	27
3.6	Porovnání starších výsledků altimetrie s nevějšími	28
3.7	Střední SST	29
3.8	Topografie Marsu	31
3.9	Princip bistatické altimetrie	32
4.1	Typy interferometrie	34
4.2	Grafické znázornění využití dvou detektorů	35
4.3	Geometrie snímkování	37
4.4	Geometrie snímkování	39
5.1	Zájmové území	47
5.2	Rozmístění bodů pro snímek 25432	49
5.3	25432 Vektory posunů	51
5.4	11561 Vektory posunů	53
5.5	06050 Vektory posunů	55
P.1	Rozmístění bodů pro snímek 11561	II
P.2	Rozmístění bodů pro snímek 06050	II

Seznam tabulek

2.1.	Parametry družice ERS pro cyklus 35 dní	14
2.2.	Rozdíly parametrů družice ERS pro různé cykly	15
2.3.	Harmonogram cyklů pro ERS-1	15
2.4.	Parametry zařízení na družicích ERS	16
4.1.	Ukázka změny rozlišení pro družici ERS	38
5.1.	Použité orbity	48
5.2.	Posuny a jejich odchylky	50
5.3.	Rozdíly snímků a mapy před a po opravě	52
5.4.	Provedený posun	52
5.5.	Rozdíly snímků a mapy před a po opravě	54
5.6.	Provedený posun	54
5.7.	Rozdíly snímků a mapy před a po opravě	56
5.8.	Provedený posun	56
P.1.	Odečtené souřadnice bodů zpracované snímky orbity 25432	III
P.2.	Rozdíly mezi mapou z Google Earth a snímky orbity 25432	IV
P.3.	Odečtené souřadnice bodů zpracované snímky orbity 11561	V
P.4.	Rozdíly mezi mapou z Google Earth a snímky orbity 11561	VI
P.5.	Odečtené souřadnice bodů zpracované snímky orbity 06050	VII
P.6.	Rozdíly mezi mapou z Google Earth a snímky orbity 06050	VIII

Seznam zkratek

DEM	Digital Elevation Model (digitální model terénu)
DEOS	Delft Institute of Earth Observation and Space Systéme
DORIS	Delft object-oriented radar interferometric software
ERS	European Remote Sensing Satellite
ESA	European Space Agency (Evropská kosmická agentura)
GPS	Global Positioning System (globální polohový systém)
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Národní úřad pro vesmír a letectví)
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency (Národní agentura pro geoprostorové informace)
RAR	Real Aperture radar
RADAR	Radio Detection and Ranging
SAR	Synthetic Aperture Radar (radar se syntetickou aperturou)
SIR	Shuttle Imaging Radar
S-JTSK	Systém Jednotné trigonometrické sítě katastrální
SLAR	Side-Looking Aperture Radar (radar bočního pohledu)
SLC	Single-Look Complex Data
SLR	Side-Looking Radar (radar bočního pohledu)
SNAPHU	Statistical-cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
WGS-84	World Geodetic System 1984 (Světový geodetický systém 1984)

Kapitola 1

Úvod

Dálkový průzkum Země je jednou z geoinformačních technologií, která se zabývá pořizováním, zpracováním a analýzou leteckých a družicových snímků. I když se tato metoda poprvé objevuje ve druhé polovině 20. století, je v dnešní době díky svému rychlému vývoji metodou poměrně rozšířenou a žádanou. Nejspíš právě proto, že má široké využití například v oblastech geografie, kartografie, zemědělství, lesnictví, ekologie, pro vojenské i veřejné použití...

Aby měla data co nejširší uplatnění, snažíme se o jejich co největší přesnost. Základem přesnosti dat je určení dráhy družice. Již první družice nesly altimetr, který měří výšku nad povrchem. Nejprve se využívala jen data z měření nad oceány, protože jsme nebyli schopni z dat nad pobřežím nebo nad pevninou získat kvalitní výsledky. Dnes již jsme data schopni zpracovat. Altimetr hraje také významnou roli při určování dráhy, na niž působí spousta vlivů, jako například gravitační pole Země, gravitační a slapové síly Měsíce, Slunce a jiných planet, vliv tlaku atmosféry a slunečního záření... Ze začátku se hodnoty těchto vlivů získávaly pouze empiricky. Již existovaly nějaké představy o rozložení sil působení gravitačního pole Země na ostatní tělesa včetně družic. Byly vytvořeny modely průběhu geoidu, které měly také svůj vliv na výpočet dráhy družice. Proto měla získaná data poměrně velké chyby. Dnes, kdy jsou data z družic součástí vzniku modelů geoidu, jsme schopni jednotlivé vlivy určovat až s centimetrovou přesností.

Ta se pak mohou dostat do zpracování radarovou interferometrií. Tato metoda zpracovává páry družicových snímků daného území a z těchto informací vyhodnocuje digitální modely terénu, modely deformací apod. Výhodou je vytvoření velkého množství trojrozměrných dat v krátkém časovém úseku. Data postupují do

dalších procesů dle svého využití. Hlavním kritériem zpracování dat radarovou interferometrií je dostatečná kvalita dat pro určené použití.

Cílem mé diplomové práce je odhalení a opravení chyb drah družice ERS-1 a ERS-2, pomocí srovnání georeferencovaných snímků s podkladem získaným jinou technologií (Google Earth). Chyby vznikají různé jak ve směru podélném (ve směru letu družice), tak ve směru radiálním (kolmém na let družice). V závěru práce bude pojednání o možném vzniku chyb. Použitá data byla poskytnuta Evropskou kosmickou agenturou laboratoři dálkového průzkumu Země Fakulty stavební ČVUT.

Kvalitu opravených dat budu hodnotit porovnáním dalšího posunu se směrodatný-mi odchylkami výsledných posunutých snímků.

Kapitola 2

Radar a použitá data

2.1 Charakteristiky radaru a technologie SAR

Radar (*Radio detection and ranging*) – radiolokátor je zdroj elektromagnetických pulzů a zároveň jejich přijímač ve svém zorném poli. Pomocí těchto impulzů objekt identifikuje, zaměří a určí jeho vzdálenost. Využívá části spektra záření o vlnové délce $\lambda = 1 \text{ mm} - 1 \text{ m}$, neboli $f = 300 \text{ MHz} - 300 \text{ GHz}$, které se nazývá mikrovlnné. Toto záření na rozdíl od jiných prochází oblačností, mlhou, tmou i smogem a je citlivé na drsnost a vlhkost povrchu. Díky těmto vlastnostem je možné měřit téměř za jakéhokoliv počasí a tam, kde ostatní metody selhávají. Aby se vyvarovalo společnému zaznamenání odrazu signálu ze dvou odlišných míst, snímkuje se v šikmém směru.

Díky způsobu vysílání a přijímání impulzů se dělí radiolokátory na monostatický, který má na tyto obě funkce pouze jednu anténu, a na bistatický, který má dvě antény, každou s jiným módem.

Specifickou třídou radarů jsou zobrazující radary (*imaging radars*) jako např. radar s bočním snímáním – SLR (*Side-Looking Radar*), SLAR (*Side-Looking Aperture Radar*), RAR (*Real Aperture radar*) a také SAR – *Synthetic Aperture Radar*. První SLAR byl nekoherentní radar, který nedokázal zachovat informace o fázových posunech vln. Proto se začaly používat fyzikální dlouhé antény RAR poskytující dostatečné rozlišení ve směru letu.

Radar se syntetickou aperturou (SAR) je typ radaru, který zpracovává radarová data k vytvoření velmi úzkého paprsku. To mu umožní vysoké rozlišení s fyzicky krátkou anténou. Tento radiolokátor zaznamenává rozdíly frekvencí zpětného rozptylu (na základě Dopplerova jevu) v různých polohách nosiče během

doby ozařování zemského povrchu vysílanou energií – signály s většími odchylkami frekvencí nejsou použity.

2.2 Družice ERS

ESA (*European Space Agency*) vytvořila první satelitní řadu pořizující data pro komerční účely, zaměřenou na aplikaci dat v životním prostředí a v mapování. V této řadě byly vyrobeny družice ERS (*European Remote Sensing Satellite*), které jsou specializované na mikrovlnné záření. Hlavní částí těchto družic je přístroj SAR – radar se syntetickou aperturou fungující v Image módu, který získává data za jakéhokoliv počasí nezávisle na intenzitě světla či oblačnosti.

Družice ERS-1 byla vypuštěna s plánovanou životností pěti let na oběžnou dráhu v červenci roku 1991. O necelé 4 roky později – v dubnu roku 1995 k ní byla vyslána družice ERS-2. Tyto dvě družice tvořily po devět měsíců tandemový pár, kdy ERS-2 následovala ERS-1 s 30 minutovým zpožděním a to umožňovalo pořizování stereo dvojic snímků jednoho území po 24 hodin. Dráhy obou družic byly udržovány tak, aby se neodchýlily z trasy o více než 1 km. Pracovaly ve dvou režimech v závislosti na snímaném území. Image mode – přelet nad pevninou a wave/wind mode – nad mořem. Družice ERS-1 a ERS-2 se pohybovaly na sluneční synchronní dráze (viz. kap. 3.5.4) s těmito parametry :

Hlavní poloosa	7159,5 km
Excentricita	0,0001042
Argument perigea	92°29′
Sklon	98°32′
Výška:	782 km
Cyklus:	35 dní
Rychlost:	7 554,27 m
Doba oběhu:	100 min
Počet přeletů za den:	13
Nosná frekvence:	5 300 GHz

Tabulka 2.1. Parametry družice ERS pro cyklus 35 dní

Délka cyklu	3 dny	35 dnů	168 dnů
Hlavní poloosa	7153,138 km	7159,496 km	7147,191 km
Sklon	98°31′	98°32′	98°29′
Výška	785 km	782 km	770 km
Počet přeletů za cyklus	43	501	2411

Tabulka 2.2. Rozdíly v parametrech družice ERS pro různé cykly (převzato z [3])

Fáze	Začátek	Konec	Cyklus
Fáze uvedení	25.7.1991	10.12.1991	3 dny
Ledová fáze	28.12.1991	30.3.1992	3 dny
Roll Tilt fáze	4.4.1992	13.4.1992	3 dny
Multidisciplinární fáze	14.4.1992	21.12.1993	35 dnů
Druhá ledová fáze	23.12.1993	10.4.1994	3 dny
První geodetická fáze	10.4.1994	28.8.1994	168 dnů
Druhá geodetická fáze	28.8.1994	21.3.1995	168 dnů
Tandemová fáze	21.3.1995	5.6.1996	35 dnů
Hibernace	Červenec 1996	Červenec 1998	35 dnů
Multidisciplinární fáze	Červenec 1998	Březen 2000	35 dnů

Tabulka 2.3. Harmonogram cyklů pro ERS-1 (převzato z [2])

Ledová fáze mapovala Severní ledový oceán. Mapování bylo provedeno s vyšší frekvencí, proto je cyklus zkrácen na 3 dny. Při Roll Tilt fázi získává SAR data s odlišným úhlem pohledu. Satelit byl otáčen a výkon altimetru mohl být snížen, což znamenalo zhoršení přesnosti oběžné dráhy. 35-denní cyklus konečně pokrývá celou Zemi a altimetrické dráhy jsou od sebe 39 km. Geodetické fáze vznikly kvůli zlepšení gravitačního modelu Země pomocí altimetru. V tandem fázi jsou oba satelity na stejné oběžné dráze s 24 hodinovým zpožděním. Tuto fázi využívá interferometrie. Během hibernace byl systém testován probuzením každých 70 dnů na 3 dny.

ERS-2 létá pouze v 35 denním režimu.

Přesto, že byla životnost družice ERS-1 plánována na pět let, pracovala až do roku 2000, kdy byla její mise definitivně ukončena pro závadu na hlavním řídicím systému. Družice ERS-2 je ještě aktivní.

2.3 Vybavení družice ERS

Družice ERS–1 nesla následující:

AMI (Aktive Microwave Instrument) – aktivní mikrovlnné zařízení tvořené radiolokátorem SAR pro radarové snímání a měření výšky vln a rozptyloměrem WMS (Wind Scatterometer) pro měření směru větru

RA (Radar Altimeter) - pro měření svislých výšek

ATSR (Slony Track Scanning Radiometer and Microwave Sounder) - tvořený infračerveným radiometrem pro měření teploty hladiny oceánů

MWR (Microwave Radiometer) - pro měření obsahu vodních par v atmosféře

LLR (Laser Retro-Reflector) - laserový koutový odražeč pro určení vzdálenosti družice od pozemních stanic

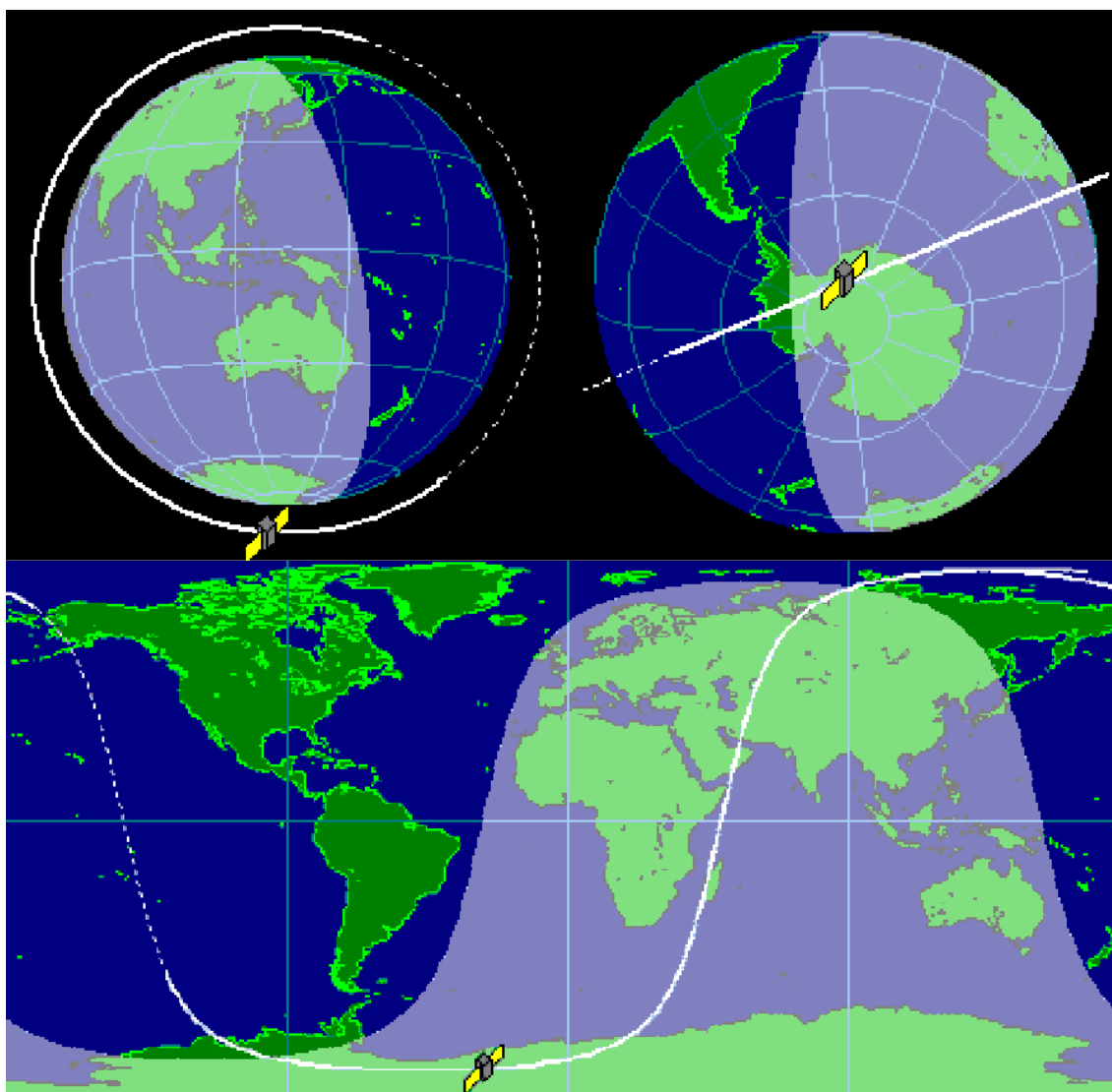
PRARE (Precise Range and Range-rate Equipment) - přesný systém pro měření dráhy, nebyl dlouho aktivní, proto se dráha určovala pomocí dat z altimetru.

Družice ERS – 2 navíc obsahovala:

GOME (Global Ozone Measuring Experiment) – pro globální monitorování stavu ozónové vrstvy

Zařízení	Frekvence	Prostorové rozlišení	Záběr
AMI-SAR (obrazový režim)	5.3 GHz (pásmo C)	30 m	100 km
AMI-SAR (vlnový režim)	5.3 GHz (pásmo C)	10 m	5x5 km
AMI-WMS	5.3 GHz (pásmo C)	50 km	500 km
RA	13.8 GHz (pásmo K)	10 cm	1.3°
ATSR		1 km	500 km

Tabulka 2.4. Parametry zařízení na družicích ERS (převzato z [10])



Obrázek 2.1 Dráha družice ERS-1 (převzato z [3])

2.4 Použité programy

2.4.1 Gama

GAMMA je software vytvořený především pro interferometrické zpracování. Software byl využit pro georeferencování.

2.4.2 Google Earth

Google Earth je virtuální glóbus dříve známý jako Earth Viewer. Tento software byl vytvořen firmou Keyhole, Inc. a v roce 2004 zakoupen portálem

Google. Jedná se o program, který umožňuje prohlížet Zemi jako ze satelitu. Umožňuje naklonění a přiblížení, někdy i ve velkém rozlišení (zejména online, kdy si program nahrává další detaily).[14]

V programu Google Earth byl proveden odečet jednotlivých souřadnic bodů pro vypočtení posunu.

2.4.3 Microstation V8

MicroStation je základní softwarová CAD platforma pro uživatele (jednotlivce i velké pracovní týmy) nejrůznějších typů: architektky, projektanty pozemních i liniových staveb, geodety, kartografy a další profese. Každý uživatel, který se účastní procesu vytváření projektové dokumentace, má možnost využívat MicroStation podle svých potřeb – např. s navazujícími aplikacemi, které v souhrnu tvoří integrovaný balík snadno použitelných a univerzálních nástrojů. MicroStation výkonně zpracuje rastrová data a obsahuje i nástroje pro finální prezentaci projektu, zajistí nejen projektování a 3D modelování, ale i vizualizaci, animaci a velmi kvalitní prezentaci projektu.

V programu MicroStation byly vytvořeny obrázky s názorným vykreslením posunů.

Kapitola 3

Družicová altimetrie

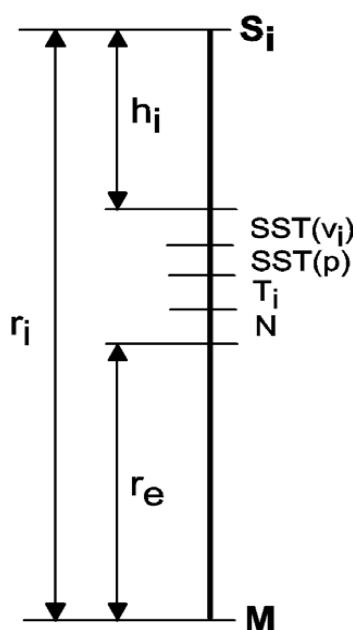
Družicová altimetrie je na pomezí kosmické geodézie a astronomie. Studuje nejen gravitační pole Země (globálně i regionálně) s bezprecedentní přesností a rozlišovací schopností a bezkonkurenční rychlostí pokrytu oceánů a moří měřeními, ale i topografii mořské hladiny a její variace. Tím je altimetrie prospěšná nejen geodézii (zpřesnění průběhu geoidu, detailní průběh mořského geoidu, jednotný systém výšek, studium slapů), ale i geofyzice (vše jmenované plus objevy podmořských hor, detailní struktura mořského dna a zlomových struktur) a oceánografii (nesezónní variace topografie moří jako jsou El Niño/ La Niña, mořské proudy, přenos tepla mezi oceánem a atmosférou). Dalším geovědním oborům bude altimetrie prospěšná po zvýšení přesnosti nebo po zavedení laserových výškoměrů (nárůst hladiny moří v důsledku údajného globálního oteplování) pro klimatologii, studium variací ledové pokrývky „polárních“ čepiček planety (glaciologie), pro hydrologii (studium variací výšek hladin velkých jezer a vnitřních moří), geologii, meteorologii, ekologii, aj.

Z aplikací altimetrie je geodézii nejbližší určení parametrů gravitačního pole Země a co nejdetailnějšího a nejměrohodnějšího průběhu (oceánské části) geoidu, který je dnes znám přesněji nad oceány (kde je radarová altimetrie plně funkční) než nad pevninami (vč. zaledněných oblastí). Nad oceány se přesnost určení plochy geoidu odhaduje na $\delta N = \pm 0.2$ m, nad pevninami na ± 1 m. Změnu toho stavu může přinést až principiálně nová metoda, umožňující měření globálně, i nad pevninami (družicová gradientometrie). A také opačná metoda, kdy na základě známého průběhu geoidu počítáme dráhy družic. [9]

3.1 Princip altimetrie

Základem altimetrie je změření výšky letu družice h_i nad hladinou oceánu nebo jiným povrchem radiolokačním nebo laserovým altimetrem, který musí být orientovaný ve směru místní vertikály – ve směru nadiru.

Z tranzitního času změří altimetr výšku letu družice h'_i v bodě S_i a čase t_i . Abychom získali h_i , musíme tuto hodnotu opravit o přístrojové korekce, korekce spojené s šířením signálu atmosférou a interakce signálu s hladinou (povrchem) a odrazem od hladiny.



Obrázek 3.1 Princip altimetrie (převzato z [11])

V obr. 3.1 je r_i geocentrický průvodič družice v čase t_i , S_i hmotný střed družice nesoucí výškoměr, h_i měřená výška, r_e průvodič referenčního elipsoidu (je daný), N odlehlost geoidu od referenčního elipsoidu, SST topografie mořské hladiny složená ze dvou složek – variabilní v_i a permanentní složky p a T_i jsou oceánské slapové vlivy.

Podle obr. 3.1. platí fundamentální altimetrická rovnice:

$$r_i = h_i + SST(v_i) + SST(p) + T_i + N + r_e \quad (3.1)$$

Někdy se zavádí veličina výška povrchu oceánu ssh (sea surface height):

$$ssh = SST(v_i) + SST(p) + T_i + N \quad (3.2)$$

Hodnoty veličin určujeme postupnou aproximací.

3.2 Diferenciální (crossover) altimetrie

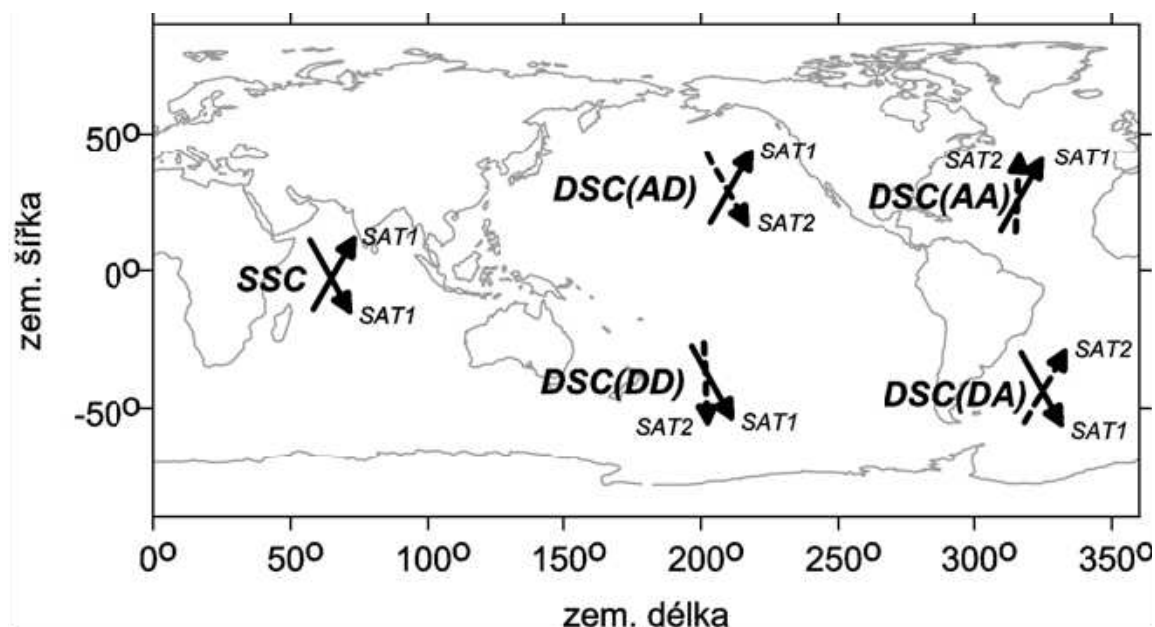
Pro diferenciální altimetrii je velmi důležitá rezonance drah družic. Tím, že jsou dráhy družic v rezonanci, můžeme ze křížících se vzestupných a sestupných oblouků vytvořit „stabilní“ síť bodů. Vzestupné oblouky jsou části drah družice, jejichž průmět na Zemi vytváří křivku se zvětšující se zeměpisnou šířkou. Analogicky je to se sestupnými oblouky.

Nyní máme alespoň dvě měření jejichž rozdíl je fundamentální rovnice družicové „diferenciální“ altimetrie (*cross-over altimetry*):

$$x \equiv r_a - r_d = h_a - h_d + SST(v_a) - SST(v_d) + T_a - T_d \quad (3.3)$$

Ostatní proměnné jsou pro bod neměnné a proto se odečtou. Tak nemají jejich chyby na výpočet (například variability *SST*) vliv.

Diferenciální altimetrii dělíme na *SSC* (*Single Satellite Crossovers*) a *DSC* (*Dual Satellite Crossovers*). U *SSC* jsou průsečíky oblouků pouze jediné dráhy, proto má pouze jeden typ křížících se bodů. U *DSC* se protínají oblouky dvou různých drah (*A,D*). Opět zde záleží na kombinaci vzestupného a sestupného oblouku, proto vznikají čtyři typy křížících se bodů – *AA*, *AD*, *DA* a *DD*.



Obrázek 3.2 Ukázka SSC a DSC (převzato z [11])

3.3 Altimetrická měření

Po zvážení vlivu atmosféry na signál je ideální frekvence družicových altimetrů 2-20 GHz. Tuto frekvenci dále dělíme na pásmo *S*, kde f je 1,6–4,2 GHz, na *L*, kde f je 4,2–5,8 GHz, na *X*, kde f je 5,8–10,9 GHz a na pásmo *K_u*, kde f je 10,9-20 GHz.

Aby bylo měření co nejpřesnější, snažíme se o vytvoření co nejkratšího signálu ($3 \cdot 10^{-11}$ s). Čím by byl signál kratší, tím by měla být větší anténa a radar by měl mít vyšší výkon. Protože je toto nereálné, používá se lineárně frekvenčně modulovaný komprimovaný („speciálně tvarovaný“) pulz (chirp). Díky rozbíhavosti signálu se po dopadnutí na hladině vytvoří *footprint* (otisk). I velikost otisku jsme schopni korigovat.

Altimetr vyšle až tisíce impulzů za sekundu. Abychom zjistili co nejpřesnější tranzitní čas, měření průměrujeme. Vzhledem k tomu, že se signál odráží od svrchních částí vln, při bouřích, nebo velmi neklidném moři (vlny > 4 m) měření neprovádíme.

3.4 Altimetrické korekce

Aby bylo měření co nejpřesnější, musíme data opravit o altimetrické korekce:

- Altimetr není v těžišti družice
- Ionosférická korekce

Ve vysoké atmosféře vzniká přítomností volných elektronů. Její amplituda dosahuje 10 cm, ale my ji jsme schopni určit a odstranit s přesností ± 1 cm. Závisí na zeměpisné šířce.

- Troposférická korekce

Dělí se na suchou a mokrou. Suchá korekce je funkcí tlaku atmosféry a její teploty. Závisí na zeměpisné šířce. Její amplituda je 2 m. Mokrý vzniká díky vodním parám z mraků. Měříme ji z družice zároveň s altimetrickým měřením. Je výrazně menší oproti suché korekci - 20 cm. Obě korekce jsme schopni určit s přesností ± 1 cm.

- Sea state bias (EM)
systematická odchylka v měřené výšce

3.5 Radiální chyba dráhy

Abychom mohli maximálně využít měření z umělé družice Země, musíme znát co nejpřesněji její dráhu (dráhové elementy popisující její pohyb). Dráha se v radiálním směru určuje lépe, než ve směru podélném. Působí na ni celé množství vlivů. Vlivy gravitačního pole Země, přímý a nepřímý vliv Slunce, Měsíce, ostatních planet, odpor atmosféry, tlak slunečního záření ... Naší snahou je jednotlivé vlivy určit a odstranit.

S prvními družicemi se radiální chyba pohybovala i v rámci 1 metru. V tu dobu díky nedokonalé technice byly jednotlivé vlivy určovány pouze empiricky. Svůj vliv na tehdejší přesnost drah měly i nepřesné modely Země, které také měly svůj podíl na určování dráhy družic. Dnes, díky poměrně rychlému vývoji přístrojů a algoritmů, jsme schopni určit radiální průběh dráhy s přesností ± 1 cm. Největší podíl na této chybě má tlak slunečního záření, zatímco vliv nejnovějších modelů Země je subcentimetrový.

Pro *GEOSAT*, *ERS 1* a *ERS 2* s modely gravitačního pole jako byl EGM 96 nebo GRIM 5 (cca 1998) byla radiální chyba decimetrová. Ovšem my jsme používali Delft precise orbits, kde deklarují 5 cm v radiálním směru a cca 15 cm ve směru kolmém na dráhu.

3.5.1 Radiální chyba jako funkce sklonu roviny dráhy

Pro pozorování radiální chyby mezi modely Země a drahami družic si musíme vyjádřit radiální chybu jako funkci sklonu. K určení dráhy potřebujeme znát její průvodič r :

$$r = a \cdot (1 - e \cdot \cos E) \quad (3.4)$$

kde a, e a E jsou dráhové elementy a to hlavní poloosa dráhy, excentricita dráhy a excentrická anomálie. Totální diferenciál Δr :

$$\Delta r = (1 - e \cdot \cos M) \cdot \Delta a + a \cdot (e - \cos M - e \cdot \cos 2M) \cdot \Delta e + a \cdot e \cdot \sin M \cdot \Delta M \quad (3.5)$$

kde M je střední anomálie.

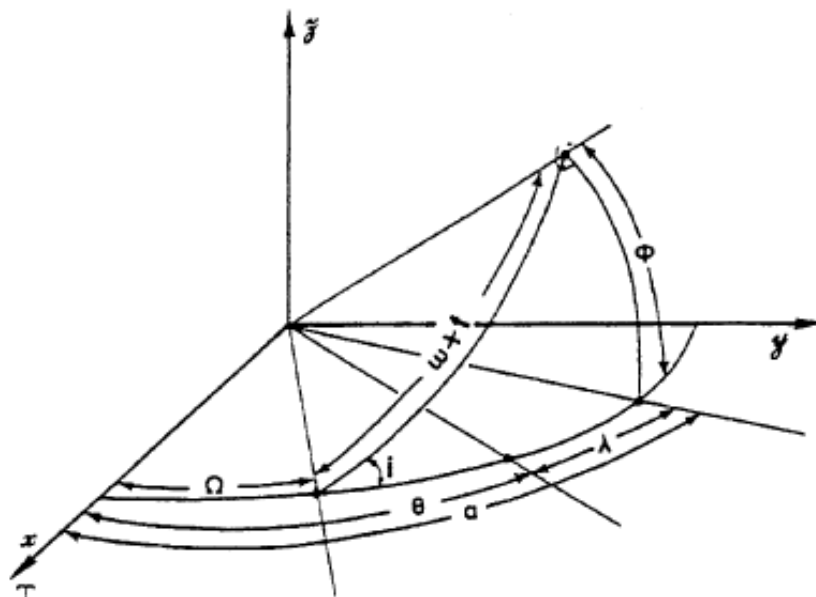
$$\Delta r_{lp}^0 = n \cdot a \cdot \left(\frac{R}{a}\right)^l \cdot F_{lp}(I) \cdot \left[\frac{2 \cdot (l - 2p)}{\psi_{lp0}} + \frac{4p - 3l - 1}{2\psi_{lp1}} + \frac{4p - l + 1}{2\psi_{lp(-1)}} \right] \cdot S_{lp0} = D_{lp} \cdot S_{lp0} \quad (3.6)$$

$$S_{lmpq} = C_{l,m} \cdot \cos \psi_{lmpq} + S_{l,m} \cdot \sin \psi_{lmpq} \quad (3.7)$$

kde n je střední denní pohyb družice, F je funkcí sklonu, ψ jsou časové derivace úhlu ψ_{lmpq} a $S_{l,m}$ a $C_{l,m}$ jsou Stokesovy koeficienty. Abychom z totálního diferenciálu dostali radiální chybu, musíme tuto rovnici upravit podle zákona o přenosu středních kvadratických chyb, kde místo Stokesových koeficientů budou jejich chyby – členy variančně-kovarianční matice ($COVAR C_{l,m}, S_{l,m}$).

3.5.2 Radiální chyba jako funkce zeměpisné šířky a délky

Jiný způsob vyjádření radiální chyby pozoruje změny v závislosti na zeměpisné šířce φ a délce λ pro daný model a dráhu. Získáme ho transformací rovnice 3.6.



Obrázek 3.3 Názorná pomůcka k transformaci (převzato z [11])

Počátek souřadnic je v hmotném středu Země, osa x míří k jarnímu bodu a s osou y leží v rovině rovníku v systému spojeném se Zemí, Ω je rektascenze výstupního uzlu, ω je argument perigea, i je sklon roviny dráhy, f je pravá anomálie, θ je hvězdný čas, α je rektascenze.

Pomocí obr. 3.3 můžeme provést transformaci a výsledná rovnice pro radiální poruchu dráhy v závislosti na zeměpisné šířce je:

$$\Delta r = \sum_{l=2}^{l_{\max}} \sum_{m=0}^l \sum_{p=0}^l D_{lmp} \Phi_{lmp}^c (C_{lm} \cos m\lambda + S_{lm} \sin m\lambda) \pm \sum_{l=2}^{l_{\max}} \sum_{m=0}^l \sum_{p=0}^l D_{lmp} \Phi_{lmp}^s (C_{lm} \cos m\lambda - S_{lm} \sin m\lambda) \quad (3.8)$$

kde D_{imp} závisí na I a a a $\Phi_{imp}^{c,s}$ jsou funkcemi sklonu a šířky.

Jako i v předchozí kapitole musíme zavést zákon hromadění středních kvadratických chyb, abychom získali skutečnou radiální chybu. Ta se skládá ze dvou složek – geograficky korelovanou $\Delta\varphi$ (stejná pro r_a i r_d) a variabilní $\Delta\delta$ (pro r_a a r_d stejná velikost, ale jiné znaménko):

$$\Delta r = \Delta\gamma \pm \Delta\delta \quad (3.9)$$

kde:

$$\Delta\gamma = \sum_{l=2}^{l_{\max}} \sum_{m=0}^l Q_{lm}^c (C_{lm} \cos m\lambda + S_{lm} \sin m\lambda) \quad (3.10)$$

a

$$\Delta\delta = \sum_{l=2}^{l_{\max}} \sum_{m=0}^l Q_{lm}^s (C_{lm} \cos m\lambda - S_{lm} \sin m\lambda) \quad (3.11)$$

kde $Q_{lm}^{c(s)}$ je funkcí vlivu a spočítá se:

$$Q_{lm}^{c(s)} = \sum_{p=0}^l D_{imp} \Phi_{imp}^{c(s)} \quad (3.12)$$

Obě složky jsou funkcemi I , a , φ a m řádu Stokesových koeficientů.

3.5.3 Korelovaná a variabilní složky pro SSC a DSC

V kapitole 3.2 jsme si uvedli rozdíl mezi SSC a DSC. Při výpočtu Δx u SSC nám vypadne graficky korelovaná část:

$$\Delta x \equiv \Delta r_a - \Delta r_d = (\Delta\gamma + \Delta\delta) - (\Delta\gamma - \Delta\delta) = 2\Delta\delta \quad (3.13)$$

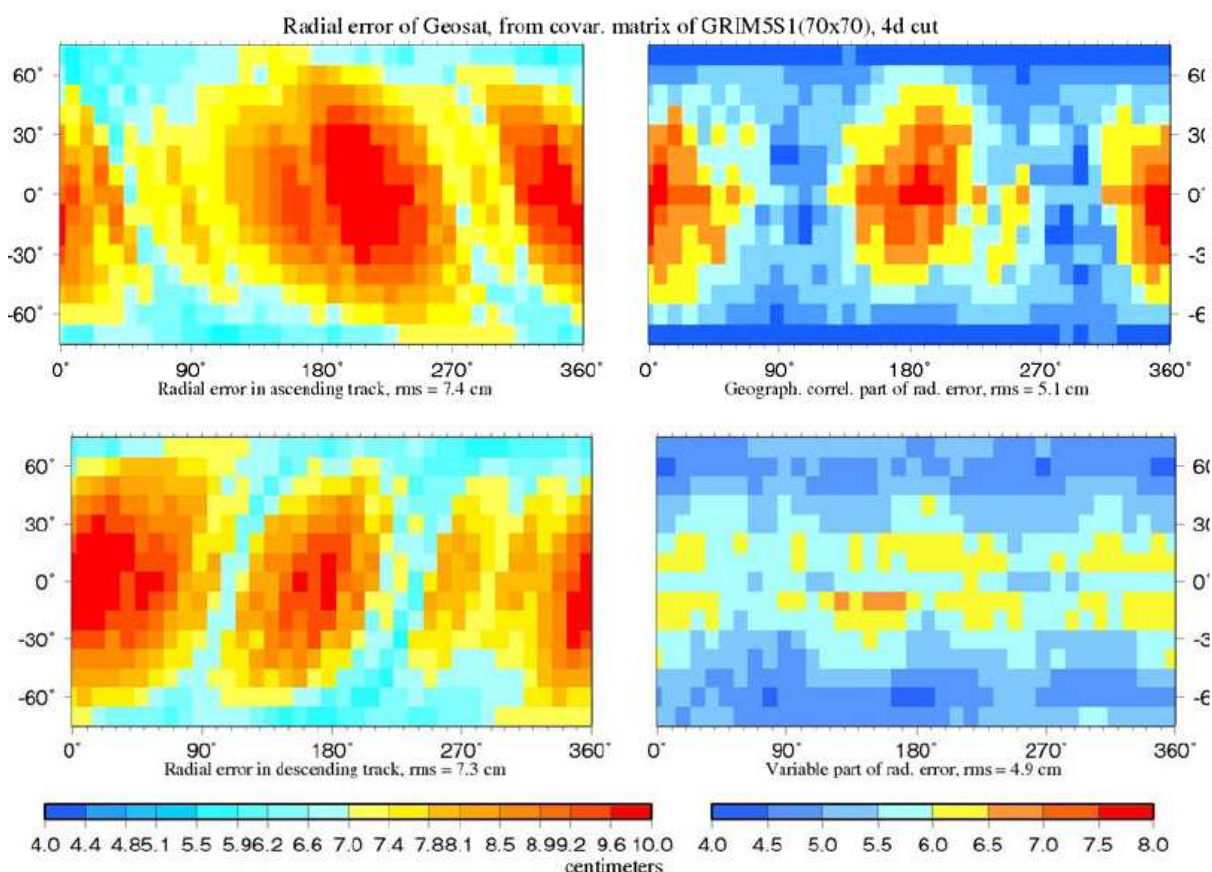
a proto pro střední kvadratickou chybu SSC můžeme zapsat $\sigma_{\Delta x} = 2\sigma_{\Delta\delta}$.

Při výpočtu u DSC se nám v rovnicích objeví i korelovaná část, která je pro všechny 4 rovnice stejná:

$$\begin{aligned} \Delta x_{12}^{AD} &\equiv \Delta r_1^A - \Delta r_2^D = (\Delta\gamma_1 + \Delta\delta_1) - (\Delta\gamma_2 - \Delta\delta_2) = (\Delta\gamma_1 - \Delta\gamma_2) + (\Delta\delta_1 + \Delta\delta_2) \\ \Delta x_{12}^{DA} &\equiv \Delta r_1^D - \Delta r_2^A = (\Delta\gamma_1 - \Delta\delta_1) - (\Delta\gamma_2 + \Delta\delta_2) = (\Delta\gamma_1 - \Delta\gamma_2) - (\Delta\delta_1 + \Delta\delta_2) \\ \Delta x_{12}^{AA} &\equiv \Delta r_1^A - \Delta r_2^A = (\Delta\gamma_1 + \Delta\delta_1) - (\Delta\gamma_2 + \Delta\delta_2) = (\Delta\gamma_1 - \Delta\gamma_2) + (\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2) \\ \Delta x_{12}^{DD} &\equiv \Delta r_1^D - \Delta r_2^D = (\Delta\gamma_1 - \Delta\delta_1) - (\Delta\gamma_2 - \Delta\delta_2) = (\Delta\gamma_1 - \Delta\gamma_2) - (\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2) \end{aligned} \quad (3.16)$$

Pro složitost výpočtů se spokojíme s těmito rovnicemi a dále je nebudeme upravovat. Kombinací těchto 4 *DSC* vznikne 12 možností, které mají zajímavé vlastnosti při vyšetřování reziduálních chyb negravitačního původu.

V následujícím obr. 3.4 můžeme pozorovat geografickou závislost radiální chyby družice GEOSAT, která se tehdy pohybovala kolem 7 cm u oblouku a kolem 5 cm pro korelovanou a variabilní složku.



Obrázek 3.4 Ukázky radiální chyby pro dráhu družice GEOSAT a kalibrovanou kovarianční maticí modelu GRIM-5S1 do $m = 70$ (převzato z [11])

3.5.4 Výběr drah altimetrických družic

Nejdůležitější je výběr *hlavní poloosy dráhové elipsy* a či výšky letu $H = a - R$ (kde R je referenční poloměr Země), *sklonu* I *roviny oběžné dráhy* družice k rovině zemského rovníku a *excentricity* dráhy e . [11]

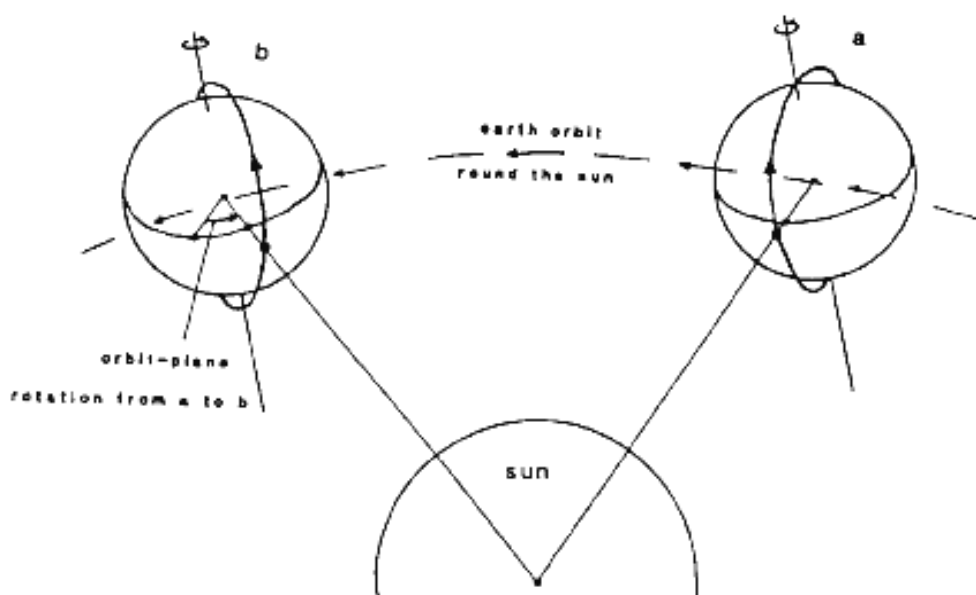
Výška letu by neměla být příliš malá pod 500 km, protože by družice byla brzděna proměnlivým odporem atmosféry, takže by bylo velmi náročné udržovat její

stálou rychlost, ale ani příliš velká nad 2000 km, kvůli velkým nárokům na speciální přístrojové vybavení. Nejčastěji se výšky drah volí mezi 800 až 1300 km.

Obdobně je to se sklonem dráhy I . Neměl by být blízký se sklonem rovníkové dráhy (0° , 180°) ani s polární (90°), protože by se špatně definovaly crossovers. Sklon dráhy se volí kolem 66° v přímé (prográdní) dráze, nebo $98,5^\circ$, 108° v nepřímé (retrográdní) dráze.

Při volbě excentricity se řídíme jediným kritériem. Protože se snažíme získat dráhu družice téměř kružnicovou, chceme excentricitu co nejmenší. Čím je excentricita větší, tím se dráha více liší od kružnice a její eliptická dráha je značně složitější na výpočty.

Heliosynchronní dráhy



Obrázek 3.5 Heliosynchronní dráha (převzato z [11])

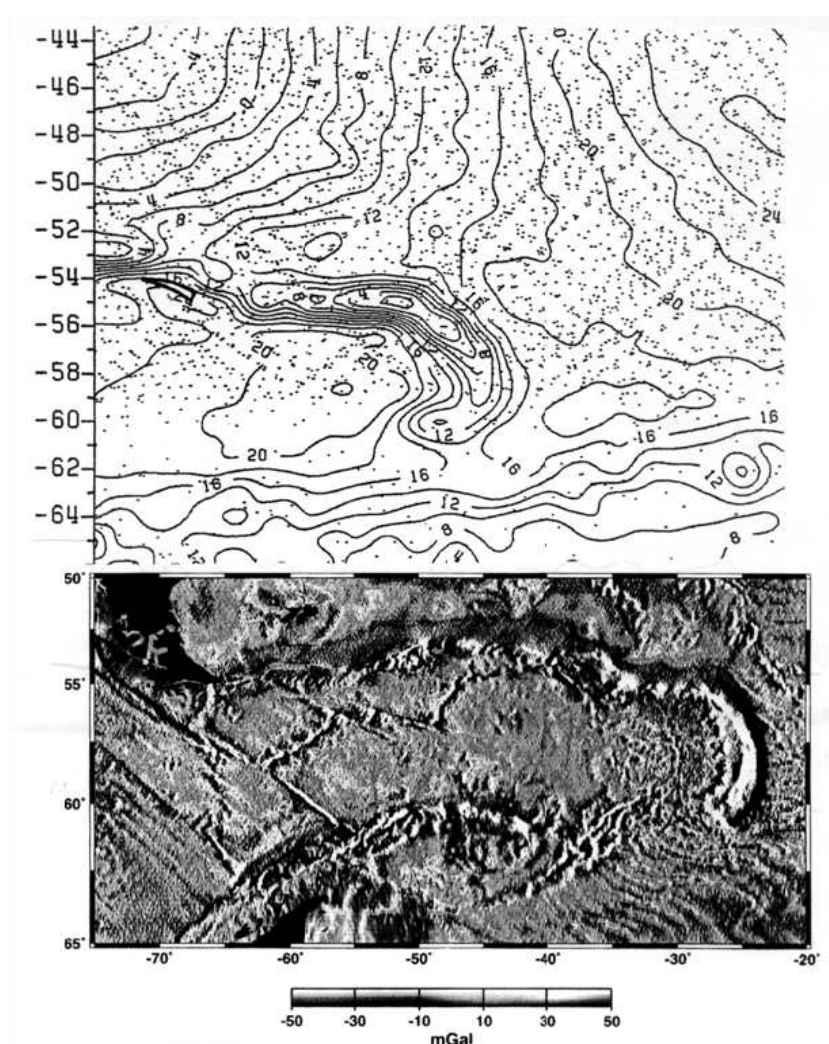
Mezi družice s heliosynchroní dráhou patří i obě družice ERS. Pohybují se po dráze splňující podmínku konstantního osvětlení, která je docílena konstantním úhlem osvětlení přístrojů.

Abychom tento úhel zachovali, otáčíme družici podle uzlu dráhy. Změna astronomické délky Slunce musí být stejná jako změna uzlu dráhy. Využíváme zde Lagrangeovu planetární rovnici. Otáčení primárně závisí na sklonu dráhy a sekundárně na hlavní poloose a na excentricitě.

3.5.5 Využití družicové altimetrie

3.5.5.1 Oceánografické aplikace

Výška povrchu oceánu *ssh*

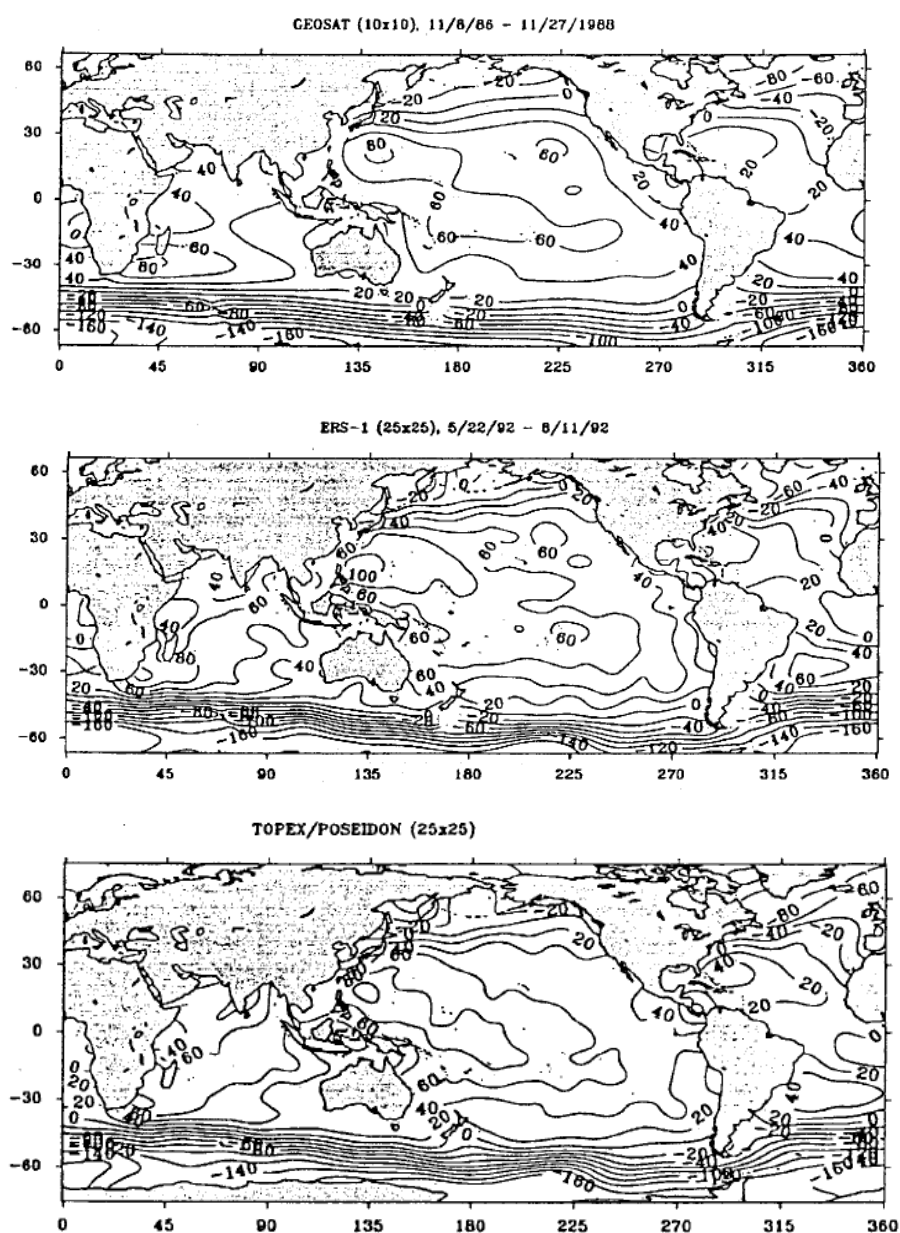


Obrázek 3.6 Porovnání starších výsledků altimetrie s novějšími (převzato z [11])

V této kapitole se budeme zabývat výše zmíněnou veličinou - výškou povrchu oceánu *ssh*, která byla dříve výsledkem altimetrie. Naše znalosti v podstatě nedokázali oddělit *SST* a *T* od *N* a proto vznikaly globální mapy *SSH* s přesností 1-2 m. Zpracování dat probíhalo metodou kolokací. Snahou těchto prací bylo zmapování povrchu oceánu, zjištění stáří litosféry, podmořských hor, zaznamenání nových tektonických změn. Na těchto mapách můžeme rozpoznat hřbety, zlomové linie, atd.

Původně však byla data nedostačující pro tvorbu barevných atlasů. To se změnilo s vytvořením nového postupu použití altimetrických dat, který na rozdíl od práce s výškami a rozdíly výšek pracují s náklonem geoidu podél trasy měření altimetru. Při takovémto zpracování dochází k vzniku tížnicových odchylek a následné transformaci na tížovou anomálii, kterou již můžeme zobrazit v barevné grafice. Mimo jiné dochází během metody k odstranění „dlouho-periodického signálu“ v altimetrickém měření.

Topografie povrchu moří a oceánů SST



Obrázek 3.7 Střední SST určená ze tří různých altimetrických družic (Shum et al., 1993) (převzato z [11])

SST představuje teplotu, hustotu i salinitu jednotlivých částí moří. Působí na ní kromě sezónních, sekulárních i krátkoperiodických vlivů také aperiodické vlivy (El Niño). Od geoidu se liší řádově v decimetrech až 1,5 m. Nejznámější model je Levitův. Roku 1982 byl vytvořen z nedružicových dat. Často bývá porovnáván s altimetrymi výsledky.

Pro altimetrii *SST* dělíme na variabilní a permanentní složku, na rozdíl od topografie pro model, kdy uvažujeme jen dlouhodobé hodnoty. *SST* nejčastěji popisujeme rozvojem v řadu kulových funkcí s harmonickými koeficienty C_{lm}^T , S_{lm}^T . Nejznámější ztvárnění *SST* z altimetrych misí je vrstevnicová mapa Shum et al z roku 1993.

Polovina veškeré energie získané od Slunce se přes atmosféru dostává do oceánů a přenáší se oceánskými proudy, které jsou úzce spojeny se *SST*. Rozdíly modelů gravitačního pole Země s těmito skutečnými proudy jsou však poměrně velké. Proto je zde prostor pro zlepšení výstupů altimetrie.

3.5.5.2 Gravitační pole Země

Parametry Země

Pomocí družicové altimetrie zpřesňujeme harmonické geopotenciální Stokesovy koeficienty C_{lm} , S_{lm} , díky nimž určujeme gravitační pole Země. Nejprve byla data pouze součástí modelů Země jako data testovací. Až později začala modely významně ovlivňovat. V 90. letech vznikají modely, kde jsou hodnoty koeficientů určeny pouze z dat altimetrie nebo diferenciální altimetrie. Mezi pozdější a známější modely, které mají Stokesovy koeficienty určené altimetrií patří např. EGM 96. Nejnovější modely však altimetrii ponechávají stranou.

Stokesovy koeficienty lze z altimetrych dat získat různými způsoby. Nejobvyklejší je výše zmíněné tíhové anomálie zkombinovat s ostatními terestrickými anomáliemi a po zprostředkujícím vyrovnání získat geopotenciální koeficienty. Dalším způsobem je využití altimetrych výšek. V neposlední řadě nesmíme zapomenout na kombinaci těchto dvou způsobů.

Testování přesnosti parametrů gravitačního pole Země

Toto využití pracuje s dvěma částmi. První jsou data z crossover altimetrie získaná za dlouhý interval a opravená o všechny možné korekce. Druhou částí je již

vytvořený model gravitačního pole Země se svými výpočty a přesnostmi. V ČR byla vypracována speciální testovací metoda, díky níž bylo testováno už řady modelů.

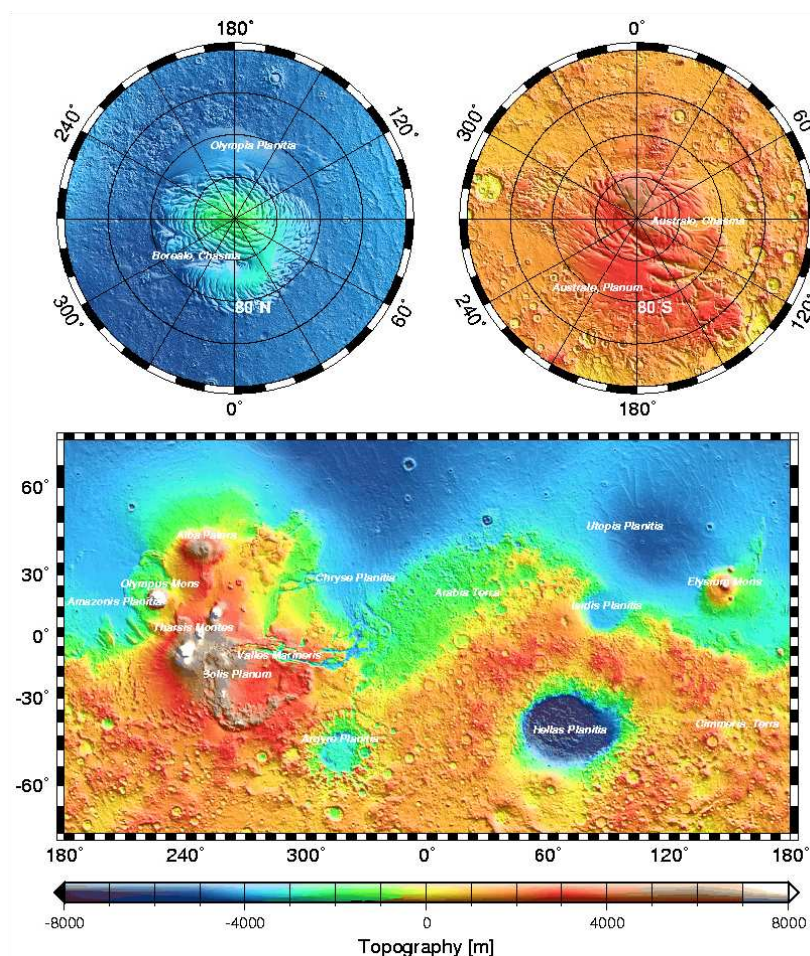
3.5.5.3 Družicová altimetrie mimo oceány

Měření na pevnině

Hlavním cílem altimetrie bylo sledování oceánů a moří. A i v pobřežních oblastech byly s vyhodnocováním dat problémy. Ale díky vývoji algoritmů na zpracování dat dnes můžeme měřit nejen na pobřeží, ale i na pevnině. Pokud známe ground tracks a crossovers na potřebných místech, můžeme sledovat změny SST na pouštích, nebo změny hladin vodstva.

Mezi další využití altimetrie patří navigace ponorek, určení geopotenciálního měřítkového koeficientu...

Družicová altimetrie mimo planetu Zemi



Obrázek 3.8 Topografie Marsu, získaná z altimetrické mise MGS (převzato z [11])

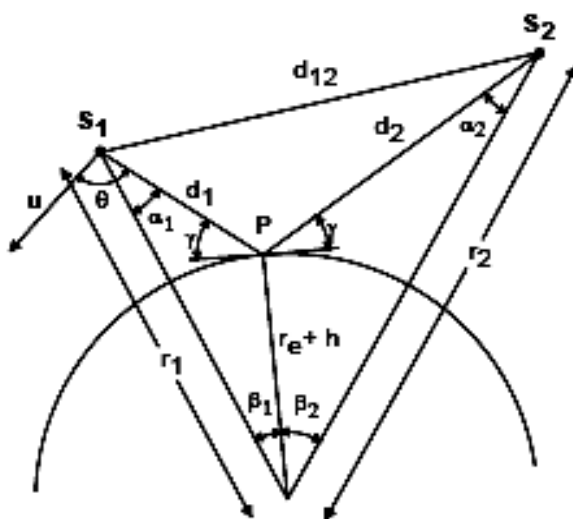
Získávání altimetrických dat mimo planetu Zemi probíhá obdobně jako na ní. Nejprve musí být meziplanetární sondy navedeny na kruhovou dráhu zkoumaného tělesa, poté je z nich směrem k povrchu altimetricky měřeno.

Takto získaná data máme již o Měsíci, Marsu a planetce Eros. Zatímco u Měsíce bylo měření jednodušší díky bližší poloze k Zemi, při snaze navedení sond na oběžnou dráhu Marsu uspěli jen některé. Navzdory tomu byl určen průběh Marsova „geoidu“ s přesností ± 2 m. Jak u planety Mars, tak u našeho Měsíce bylo zjištěno větší rovníkové zploštění, než má naše Země.

3.5.5.4 Bistatické altimetrie

Bistatická altimetrie má na rozdíl od klasické altimetrie vysílání a přijímání na dvou družicích. Vysílač nosí družice na vysoké dráze, zatímco přijímač je na dráze nízké. Přijímač je vybaven další speciální anténou, aby mohl přijímat jak signál z družice, tak odražený signál od hladiny moře. Tímto měřením získáme zpoždění signálu, díky němuž jsme schopni spočítat bod odrazu na Zemi.

I přes výhodu získání většího objemu dat nebyla zatím družice specializovaná na bistatickou altimetrii vypuštěna.



Obrázek 3.9 Princip bistatické altimetrie (převzato z [11])

3.5.5.5 Posuny souřadných systémů

Družicové systémy a přístroje spojené s určováním jejich drah, nebo na zpracování dat se neustále vyvíjí. Mezi starými a novými družicemi jsou značné rozdíly. Ale jedním z využití altimetrie je dlouhodobé mapování např. oceánského dna. Abychom byli schopni srovnávat data jak z družic starších, tak z novějších, bylo nutné vytvořit jednotný systém pro propojení altimetrických měření. Tento systém má za snahu odstranit posuny souřadných systémů mezi jednotlivými misemi.

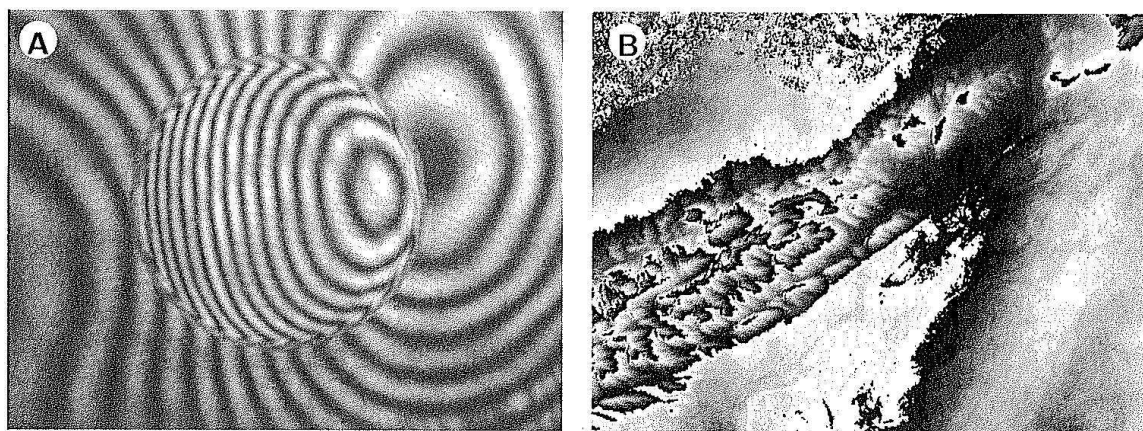
Kapitola 4

Radarová interferometrie

4.1 Princip intereferometrie

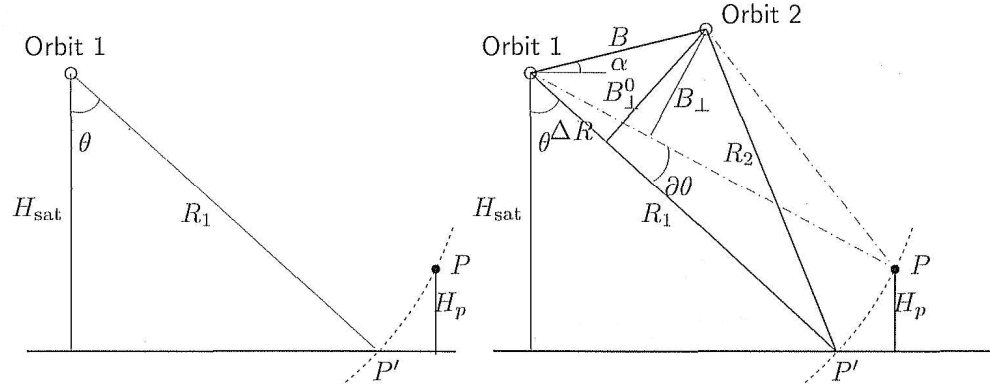
Při pozorování dvou křížících se paprsků nedochází k jejich odražení, jak by to bylo u pevných těles, ale světelné částice se pohybují ve formě kulové sféry dál, jako by každý bod byl novým zdrojem záření o stejné frekvenci a fázi. Tento způsob přenášení energie se nazývá postupná vlna.

Interferometrii dělíme na součtovou a součtinovou. Součtová interferometrie se zakládá na nekoherentním sčítání amplitud dvou vstupních signálů. Výsledkem jsou tzv. amplitudové proužky (obr 4.1 A), z kterých nelze poznat, zda signál stoupá či klesá. Součtinová interferometrie využívá koherentní křížový součin dvou vstupních signálů. Tato metoda se více používá, neboť poskytuje mnohem větší přesnost.



Obrázek 4.1 Typy interferometrie A) Součtová interferometrie B) Součtinová interferometrie (převzato z [7])

4.2 Výpočet topografické výšky



Obrázek 4.2 Grafické znázornění využití dvou detektorů k určení výšky (převzato z [7])

Jak je vidět na obr. 4.2 vlevo, při měření jedním detektorem, může dojít k zaměnění dvou a více bodů stejně vzdálených od družice, ale s jinými polohovými souřadnicemi. Informace o druhu povrchu, které jsou součástí dat, není dost kvalitní, aby je bylo možno použít k rozlišení. Proto je výhodné měřit pomocí dvou detektorů a tím rozpoznat souřadnice jednotlivých bodů.

Vzdálenost mezi těmito družicemi se nazývá interferometrická základna B . K výpočtům ale používáme její kolmý průmět do roviny kolmé ke směru paprsku – kolmou základnu $B_{\perp}$.

Dva snímky jsou tvořeny pravidelnou mřížkou komplexních hodnot y_1 a y_2 , které lze rozložit na amplitudovou a fázovou složku.

$$y_1 = |y_1| e^{j\psi_1} \quad (4.1)$$

$$y_2 = |y_2| e^{j\psi_2} \quad (4.2)$$

Po přiřazení a převzorkování mřížky y_2 na mřížku y_1 , vynásobíme hodnoty komplexně sdruženým číslem y_2^* a získáme komplexní interferogram v

$$v = y_1 y_2^* = |y_1| |y_2| e^{j(\psi_1 - \psi_2)} \quad (4.3)$$

Hodnoty fází v v obou obrázcích jsou

$$\psi_{1p} = -\frac{4\pi R_1}{\lambda} \quad (4.4)$$

$$\psi_{2p} = -\frac{4\pi R_2}{\lambda} \quad (4.5)$$

kde R_1 a R_2 jsou geometrické vzdálenosti od družic, λ vlnová délka záření. Můžeme napsat, že se interferometrická fáze Φ_p rovná

$$\Phi_p = \psi_{1p} - \psi_{2p} = -\frac{4\pi(R_1 - R_2)}{\lambda} = -\frac{4\pi\Delta R}{\lambda} \quad (4.6)$$

a poté je její derivace

$$\partial\Phi_p = -\frac{4\pi}{\lambda} \partial\Delta R \quad (4.7)$$

kde ΔR můžeme aproximovat

$$\Delta R = B \sin(\theta - \alpha) \quad (4.8)$$

Protože nemůžeme zjistit hodnotu ΔR , je znám vztah

$$\partial\Delta R = B \cos(\theta^0 - \alpha) \partial\theta \quad (4.9)$$

kde pro θ^0 je použita hodnota úhlu pohledu pro referenční povrch. Dosazením do předchozí rovnice získáme vztah pro změnu interferometrické fáze a úhlu pohledu

$$\partial\Phi = -\frac{4\pi}{\lambda} B \cos(\theta^0 - \alpha) \partial\theta \quad (4.10)$$

Pro výšku nad referenční plochou H_p

$$H_p = R_1 \sin \theta^0 \partial\theta \quad (4.11)$$

Vztah mezi H_p a $\partial\theta$ získáme dosazením do rovnice pro fázový rozdíl $\partial\Phi$

$$H_p = -\frac{\lambda R_1 \sin \theta^0}{4\pi B_{\perp}^0} \partial\theta \quad (4.12)$$

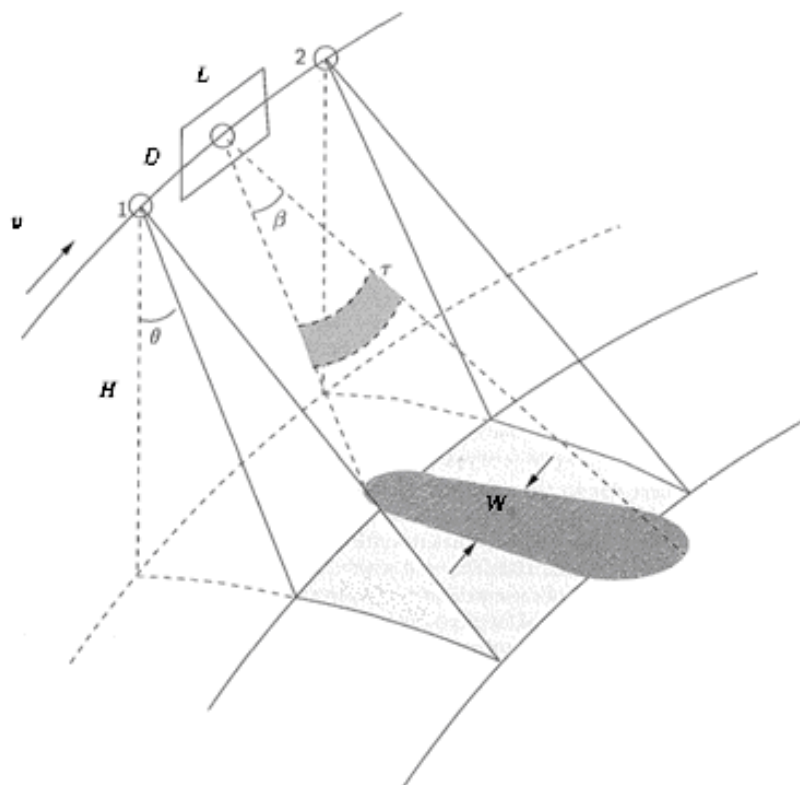
Kolmou základnu můžeme vyjádřit jako

$$B_{\perp}^0 = B \cos(\theta^0 - \alpha) \quad (4.13)$$

a dosazením $\partial\Phi = 2\pi$ získáme vztah pro výškový rozdíl odpovídající fázovému posunu o velikosti 2π

$$h_{2\pi} = -\frac{\lambda R_1 \sin \theta^0}{2B_{\perp}^0} \quad (4.14)$$

4.3 Rozlišovací schopnost radarového snímkování



Obrázek 4.3 Geometrie snímkování (převzato z [7])

Družice ERS nese radar s plošnou anténou nasměrovanou kolmo na směr letu a natočenou doprava pod úhlem $20,3^\circ$. Zatímco se pohybuje, získává informace o povrchu Země. Záběr snímkování je přibližně 100 km. Jakmile se vrátí první vyslané signály, začne se vytvářet radarový obraz. Díky časovému zpoždění a síle těchto signálů můžeme určit vlastnosti snímaného území.

Družice letí rychlostí v a vysílající signály ozařují pás Země o šířce W – šířka stopy jednoho radarového pulzu

$$W = \frac{\lambda}{L} R \quad (4.15)$$

kde L je délka antény a R vzdálenost družic od Země. Rozlišení v tomto pásu je dáno velikostí antény. Úhlová šířka paprsku v kolmém - β_r a podélném - β_a směru je

$$\beta_r = k \frac{\lambda}{D} \quad (4.16)$$

$$\beta_a = k \frac{\lambda}{L} \quad (4.17)$$

kde k je konstanta a D je šířka antény. Rozlišení r v kolmém směru je dáno délkou pulzu τ

$$\Delta r = \frac{c\tau}{2} \quad (4.18)$$

kde c je rychlost světla.

To znamená, že čím je kratší délka pulzu, tím je získané rozlišení vyšší. Ale s omezeným výkonem vysílače přicházejí chyby, jako je nízký poměr signálu k šumu. Proto je zde použito lineární modulování frekvence

$$f(t) = st, t \in \left(-\frac{\tau}{2}, \frac{\tau}{2}\right) \quad (4.19)$$

kde s je rychlost nárůstu frekvence. Díky této metodě se rozlišení kolmém směru zvýší z řádu kilometrů na řád metrů.

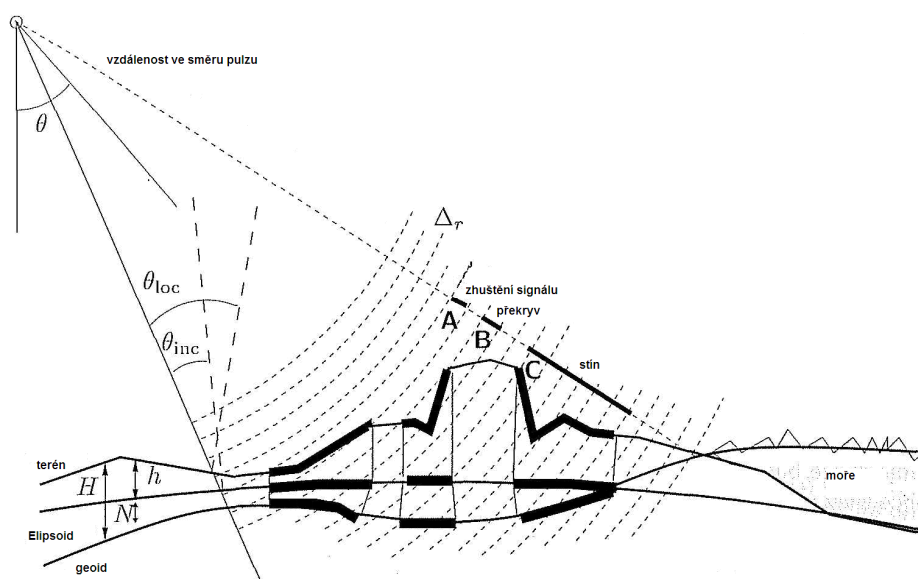
Bod je snímáný několika pulzy. Během snímání se relativní rychlost bodu vzhledem k družici mění, což musíme také zahrnout do výpočtů. Po zavedení opravy z této informace jsme opět schopni zvýšit rozlišení.

Šířka antény	$D = 1 \text{ m}$	Šířka stopy na Zemi	$W = 4,8 \text{ km}$
Délka antény	$L = 10 \text{ m}$	Rychlost družice	$v = 7554 \text{ m/s}$
Úhlová šířka paprsku		Rozlišení v kolmém směru	$\Delta r \approx 5,5 \text{ km}$
v kolmém směru	$\beta_r = 5,4^\circ$	Po modulaci	$\Delta r \approx 9,6 \text{ m}$
v podélném směru	$\beta_a = 0,228^\circ$	Po opravě z relativní rychlosti	$\Delta r \approx 5,5 \text{ m}$

Tabulka 4.1. Ukázka změny rozlišení pro družici ERS

4.4 Zobrazovací geometrie

Výsledky měření bychom chtěli zobrazit ve formě kolmého průmětu. Ale naše měření probíhá pod šikmým úhlem pohledu. Proto se převýšení zobrazují zkresleně. Navíc se na snímku objevují jevy jako zhuštění obrazu, překrytí a stín. Zhuštění vzniká, když se sklon svahů blíží tvaru soustředné kružnice se středem v místě záření. Strana směřující k družici se pak jeví ve zkrácené délce. Oproti tomu překrytí vzniká, když se sklon svahu rovná, nebo převyšuje úhel dopadu a existují pak dvě místa, z nichž se záření vrací ve stejném okamžiku. Stín se projevuje tam,



Obrázek 4.4 Geometrie snímkování (převzato z [7])

4.5 Využití radarové interferometrie

4.5.1 Topografické mapování

Digitální modely terénu vznikají zpracováním různých dat různými metodami. Jednou z metod, která se poslední dobou dostává díky svým přednostem do popředí, je radarová interferometrie. Přesnost této metody závisí na kolmé základně a pohybuje se nejčastěji v řádech desítek metrů. Princip použití vytvoření DEM je obdobný stereografické metodě. K zpracování a zjištění výškových rozdílů je potřeba dvou snímků zájmového území.

Jak je vidět na obr. 4.4, je největším problémem při vyhodnocování radarových dat překryv, stín, zhuštění signálu, dekorelace terénu a atmosférický signál v datech. Také záleží na délce kolmé základny, kdy krátká základna snižuje šum dat, ale zvyšuje vliv atmosféry a naopak. Nezapomeňme na počet přeletů. Jednopřeletová interferometrická metoda je pro topografické mapování rozhodně výhodnější, než vícepřeletová, protože jsou u ní stejné podmínky při snímání dat, a tím jsou chyby, jako vliv atmosféry, při zpracování vyrušeny.

4.5.2 Monitorování deformací

Dle zahraničních článků můžeme toto odvětví považovat za nejčastěji používané. Při monitorování deformací jednotlivých fází se vždy využívá dvojice snímků určité části období k tvorbě interferogramů. Hlavním úkolem je vytvoření spojitých deformačních map, na kterých lze pozorovat jakým způsobem k deformacím dochází. Dlouhodobé studium pak poskytuje varování před dalšími rozsáhlými škodami.

Monitorování deformací je široké, velmi důležité využití radarové interferometrie. Podle typu deformací ho můžeme rozdělit na 4 části :

Seismické jevy

Sledování těchto deformací, jako jsou například zemětřesení a tektonika, dále dělíme na preseismické, koseismické a postseismické, dle času pořízení dat ohrožené oblasti. Díky radarové interferometrii můžeme zaznamenávat tyto změny s centimetrovou přesností.

Sopečná činnost

Má stejné rozdělení jako seismické jevy.

Antropogenní pokles terénu

V důsledku těžby nerostných surovin, ropy a zemních plynů dochází k půdním sesuvům a poklesům v mnoha oblastech světa. Také hloubení tunelů a jiných podzemních staveb zvyšuje nestabilitu okolního prostředí. Takovéto poklesy jsou obvykle velmi rychlé, což je problémem pro vytvoření spojitých deformačních map.

Ledovcová činnost

Pohyby ledovců sledujeme s řádovou přesností metrů. Jedná se o nepřístupné, ledovcem trvale pokryté oblasti, které bychom těžko mapovali jinak, než využitím radarů.

4.5.3 Tématické mapování

Každé prostředí má specifické odrazivé vlastnosti. Jestliže se mezi dvěma interferometrickými měřeními vyskytnou změny této odrazivosti, může to způsobit snížení hodnot koherence, což je stupeň podobnosti mezi jednotlivými snímky. Při takovémto vyhodnocování musíme nejprve odstranit vlivy dekorelace.

4.5.4 Monitorování atmosférického zpoždění

V tomto případě nás nezajímá určení topografie území, tyto hodnoty předem známe, ani deformace, které jsou rovné nule, ale naopak pouze data, přijatá radarem. Hlavním cílem tohoto monitorování je určení odchylek radarového signálu a tím zjistit změny atmosférické lámavosti. Tato data mimo jiné nachází využití v meteorologii a ve studiu atmosférické dynamiky.

4.6 Zpracování družicových snímků

Vstupem zpracování jsou družicová data získaná ze snímání zemského povrchu. Data jsou buď ve formátu .SLC – kdy se jedná už o částečně zpracovaná data, nebo jsou přímo výstupem tzv. raw data – tato data jsou levnější, dostupnější a můžeme je libovolně zpracovat. Ovšem SLC zpracování, které je třeba provádět u raw dat, je náročné nejen na software a náš tým s tím nemá žádné zkušenosti.

4.6.1 Výběr snímků

Nejdůležitější částí zpracování je výběr snímků. Snímky jsou vybírány podle účelu zpracování. Špatný výběr by mohl zavinit nedostatečnou přesnost výsledku. Parametrů pro výběr nejvhodnějších snímků je mnoho. Pro názornou představu je jich pár uváděno níže.

Hlavní kritéria výběru je typ detektoru a dostupnost dat, která si můžeme na internetu vybrat, objednat. Další možností získání dat je jejich objednání se speciálními požadavky. Neméně důležité je časové a prostorové rozvržení hlavních linií, charakteristiky terénu a stav atmosféry během snímání. Záleží na rozlišovacích schopnostech detektoru, na vlnové délce záření, na šířce frekvenčního pásma,

velikosti šumu, na sklonu oběžné dráhy, kolikrát bylo naše území nasnímáno, s jakou periodou a v jakém ročním období...

4.6.2 Předzpracování

Po obdržení nezpracovaných dat (raw dat) je nejprve důležité zjistit, jestli jsou data celistvá. Pokud nejsou souvislá jen v malém rozsahu – pár řádků, lze chybějící řádky zkopírovat z okolních souborů. Jestliže chybí větší množství dat, není pro nás tento soubor vhodný.

Dále je důležité překrytí spektra vlnění v podélném směru.

4.6.3 Koregistrace

Po předzpracování získáme dvojici snímků, ve které si snímky odpovídají, ale mohou být vzájemně být posunuty jak v podélném (až tisíce řádků), tak v příčném směru (desítky pixelů). Naším úkolem je snímky pomocí subpixelové koregistrace na sebe napasovat. Pro urychlení rozdělujeme koregistrace na hrubou a jemnou.

Hrubou koregistraci provádíme buď manuálně, podle odpovídajících si bodů na obou snímcích, nebo pomocí parametrů orbit získaných z údajů družic. Po tomto kroku je posun mezi snímky do 10 pixelů. Jemná koregistrace využívá cross-korelaci pro koregistraci o subpixelové přesnosti.

4.6.4 Převzorkování a interpolace

Protože je nutné pracovat s jednotlivými pixely, musí být druhý snímek převzorkován na mřížku prvního, a to s přesností zhruba 0,1 pixelu. To se provede tak, že se u snímku vedlejšího (*slave*) pomocí interpolace aproximuje spojitý signál, který je následně převzorkován na mřížku snímku hlavní (*master*).

4.6.5 Filtrování

Jedním z problémů je šum v datech, který může znesnadnit rozbalení a ztvárnění dat. Aby byl potlačen, je provedeno filtrování před (*a priori*) a po (*a posteriori*) tvorbě interferogramu.

4.6.6 Tvorba interferogramu

je popsána v kapitole 4.2

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

4.6.7 Výpočet fáze pro referenční těleso

Pokud mají výsledky odpovídat skutečným souřadnicím, musíme do tohoto procesu začlenit i upravení dat podle referenčního elipsoidu, ke kterému budeme výsledné hodnoty vztahovat. Musíme vypočítat velikosti fáze, o které měření opravíme. U několika pixelů rozložených v rámci celého snímku spočítáme prostorové souřadnice družic a bodu na elipsoidu. Z těchto hodnot je vyjádřena rovnoběžná základna a fáze, která je pomocí interpolace určena pro celý snímek, a odečtena od interferogramu. Nepřesnosti v drahách družice se projeví právě v tomto kroku a výsledný snímek pak obsahuje typický fázový trend, který lze chybám v orbitách přičíst.

4.6.8 Výpočet koherence

Jedním z důležitých kroků je výpočet koherence. Díky jejím hodnotám můžeme zjistit kvalitu interferogramu. Počítá se pro okolí jednotlivých pixelů a dosahuje velikosti $\langle 0,1 \rangle$. Čím je její hodnota vyšší, tím je interferogram kvalitnější.

4.6.9 Rozbalení fáze

Rozbalení fáze je kritickým krokem zpracování. Zpracování je nejjednodušší, pokud v obrazu zobrazujícím fázi nejsou obsažena residua, to znamená, že suma zabalených fázových rozdílů mezi čtyřmi sousedícími obrazovými body v malé

oblasti je 0. To se ale téměř nestává, neboť jakmile data obsahují šum, nebo fázové rozdíly mezi sousedy překročí hodnotu π , vyskytnou se residua. V tomto případě je možné při rozbalování spojit tato residua se sousedními a opět dosáhnout nuly pro jeden řetězec. Největší problém nastává, když je obraz rozdělený řekami, nebo jinými velkými nekorelovanými oblastmi. Kvůli těmto oblastem se provádí rozbalování odděleně s následným propojením, které také není jednoduché.

4.6.10 Georeferencování

Účelem tohoto kroku je převedení rozbalené fáze a vypočtených výšek do souřadnic geodetického systému – WGS-84. Můžeme ho provádět několika způsoby. První je georeferencování dat na základě amplitudy a identických bodů a druhé je přímé georeferencování.

I když přímou metodu softwarové prostředky pro klasický DPZ tradičně neumožňují, byla použita při mém zpracování. Využívá známou výšku nad elipsoidem a jeden snímek. Abychom georeferencování mohli provést, musíme splnit následující tři podmínky:

1) Vzdálenost družice a odražeče odpovídá umístění daného odražeče v obraze – šikmá vzdálenost r (*slant-range*):

$$r^2 = (x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2 \quad (4.20)$$

kde x, y, z jsou souřadnice odražeče a x_s, y_s, z_s jsou souřadnice satelitu. Obě soustavy jsou v kartézském centrickém systému WGS-84.

2) Bod leží na Zemském povrchu (elipsoidu), resp. ve výšce h nad ním:

$$\frac{x^2 + y^2}{(N + h)^2} + \frac{z^2}{(N(1 - e^2) + h^2)} = 1 \quad (4.21)$$

kde N je příčný poloměr křivosti a e je excentricita daného elipsoidu.

3) Spojnice bodu a odražeče se od směru kolmého k letu družice odchyluje o tzv. *squint angle* ψ , odpovídající známému Doppler centroidu f_D :

$$f_{DC} = \frac{2}{\lambda} \frac{(\vec{V}_s - \vec{V}_t) \cdot (\vec{R}_s - \vec{R}_t)}{|\vec{R}_s - \vec{R}_t|} \quad (4.22)$$

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

Poslední podmínkou, která zbývá pro jednoznačné určení bodu na povrchu Země, je znalost, zda je odražeč vpravo či vlevo od dráhy letu družice. To je dáno konstrukčně.

Georeferencování ovlivňují také chyby drah družic a chyby časování. Takto vzniklý posun je zanedbatelný, protože je očekáván ve stejném rozsahu, jako sami chyby drah. Přesto mohou ostatní vlivy deformovat scénu mnohem více.

4.7 Chyby v datech

Jedním z faktorů znesnadňujících georeferencování a následnou interpretaci interferogramu jsou chyby v datech. Můžeme je rozdělit do dvou skupin – na nepřesnosti v poloze družic a na chyby v časování.

Nepřesnosti v poloze družic můžeme díky jejich směru dále rozdělit na:

- radiální - ve směru kolmém na zemský povrch (řádově 6 cm)
- across-track - ve směru kolmém na rovinu oběhu družice (řádově 15 cm)
- along-track - ve směru letu družice (neudává se, je však největší)

Chyby časování přijatého signálu:

- doby vyslání prvního signálu, jehož odezva zformuje první řádek dat (azimuttime), (řádově v milisekundách). Této chybě odpovídá along-track. Díky jednoduchosti odstranění obě chyby opravíme změnou časování.
- doby přijetí první odezvy po vyslání signálu, tedy doba mezi vysláním signálu a přijetím signálu náležejícímu prvnímu pixelu v dané lince (range-time), (řádově v mikrosekundách) Z této doby se počítá úhel pohledu, který vstupuje do mnoha dalších výpočtů.

I když se chyby časování neuvádějí, způsobují nejvíce chyb a jejich oprava je jednodušší než oprava polohy družice.

4.7.1 Projev chyb v datech

Chyby v datech se projevují třemi způsoby:

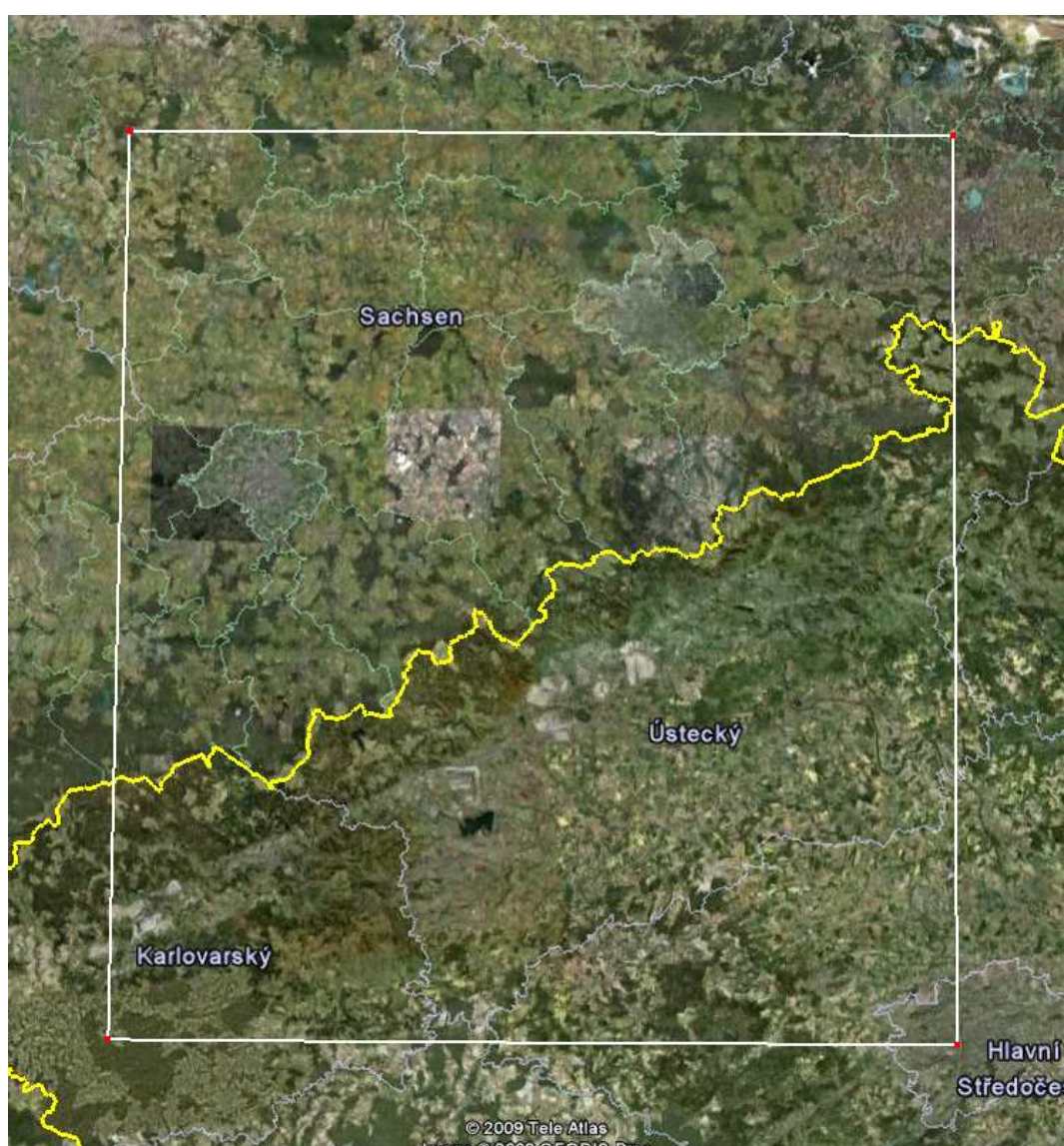
První způsob je špatný výpočet posunu mezi zpracovanými snímky. Vzniká relativními chybami v časování. Pokud mají oba snímky stejné chyby v časování, bude spočten dobře.

Druhý způsob je deformace georeferencovaného snímku vůči skutečnosti. Může být projeven posunem, natočením, změnou měřítka nebo také špatným převodem externího DEM do radarových souřadnic. Nejvýraznější je posun, mají na něj vliv všechny výše zmíněné chyby. U natočení se projevuje nepřesnost Doppler centroidu a u změny měřítka nepřesnost oscilátorů. Tyto dvě chyby nejsou pouhým okem viditelné.

Poslední způsob projevu chyb v datech je vznik tzv. reziduálních fronte ve snímku. Jsou způsobeny nepřesným odečtením fáze odpovídající zemskému povrchu bez topografie. Zde mají vliv across-track a radiální složka chyby orbit.

Kapitola 5

Vlastní zpracování dat



Obrázek 5.1 Zájmové území

Jak již je napsáno v úvodu, cílem mé práce je odhalení a opravení chyb drah družice ERS-1 a ERS-2, pomocí srovnání georeferencovaných snímků s podkladem získaným jinou technologií. Všechny 3 snímky leží na přibližně stejném území rozkládajícím se na hranicích České republiky a Spolkové republiky Německa. Jak můžeme v obr 5.1 vidět, jedná se o oblast Ústeckého kraje a Sasko ohraničenou zeměpisnými souřadnicemi v systému WGS-84.

$$\begin{array}{ccc}
 [12^{\circ}59'10''; 51^{\circ}17'35''] & \text{---} & [14^{\circ}23'57''; 51^{\circ}05'38''] \\
 | & & | \\
 [12^{\circ}36'00''; 50^{\circ}16'08''] & \text{---} & [13^{\circ}59'50''; 50^{\circ}03'42'']
 \end{array}$$

5.1 Zpracování ERS dat

Podkladem pro zpracování byla data získaná z drah družic ERS-1 (2 soubory – jeden ve formátu .SLC a druhý soubor parametrů .par) :

ERS-1	
orbit	datum
06050	11.9.1992
11561	1.10.1993
25432	26.5.1996

Tabulka 5.1. Použité orbity

Tato data byla v rámci diplomové práce nejprve zpracována v programu GAMMA dle jednotlivých kroků:

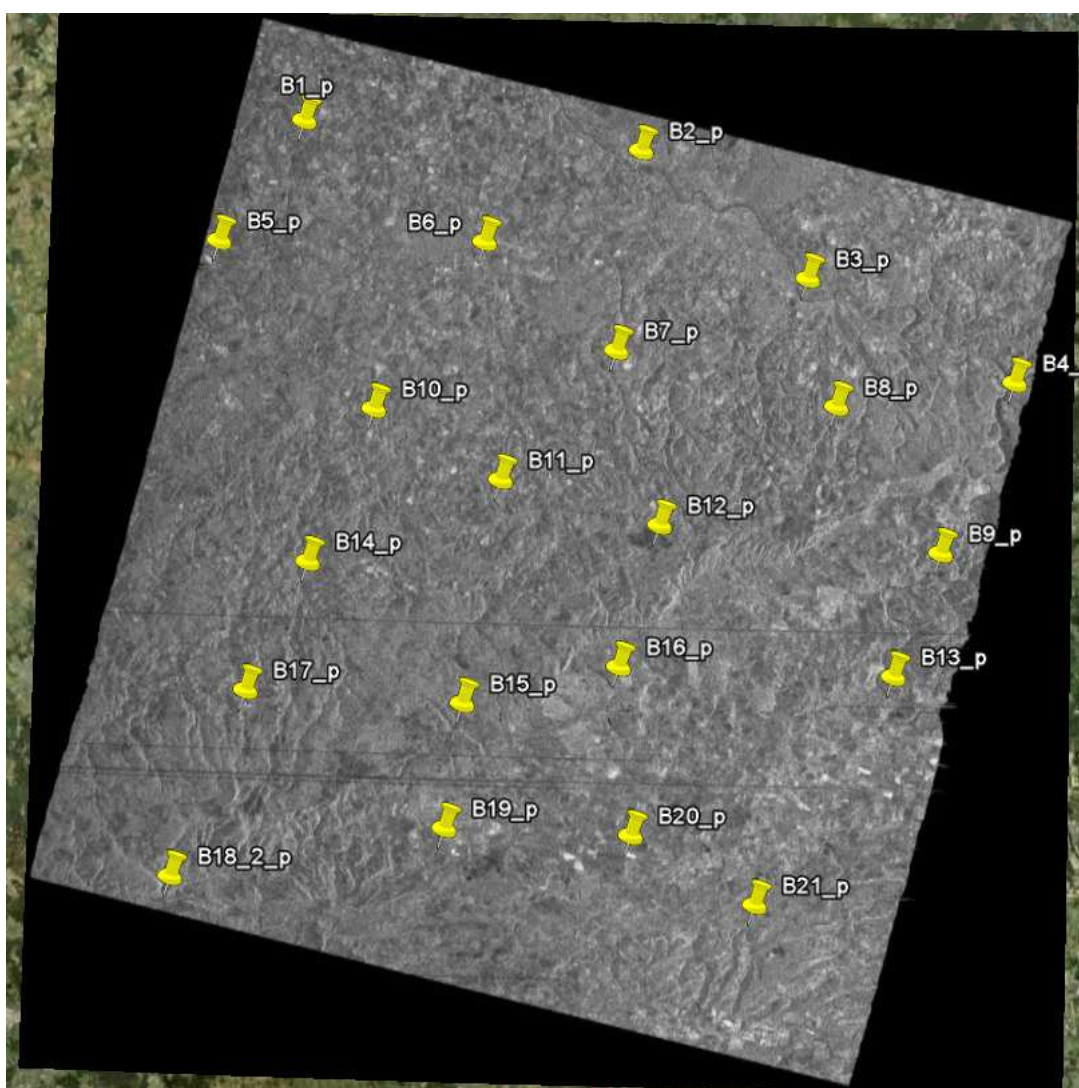
- 1) Vytvoření intenzitního obrazu ze snímku - multi_look
- 2) Spočtení tabulky pro georeferencování (lookup table) - gc_map
- 3) Samotné georeferencování - geocode_back
- 4) Převod do formátu .bmp - raspwr
- 5) Převod do formátu .kmz - par2kmz

4. a 5. krok se provádí kvůli načtení v Google Earth, kdy formát .bmp nám snímek zobrazí a .kmz umístí do souřadnicového systému.

5.3 Výpočet posunu

Po zpracování dat v programu Gamma byly soubory otevřeny v programu Google Earth. Už na první pohled bylo jasné, že jsou snímky posunuty. U snímku 25432 činil rozdíl přes 5 km.

Abychom mohli určit posun, případnou rotaci, či deformaci snímku, bylo vybráno 21 bodů rovnoměrně rozmístěných po celém snímku. I když se jednalo u všech tří snímků o přibližně stejné území, byly body vybrány různě. I u jednotlivých snímků bylo území před a po posunu různě čitelné (místa, která byla jednoznačně určená před posunem, nemusela být dobře rozeznatelná po posunu).



Obrázek 5.2 Rozmístění bodů pro snímek 25432

Po výběrů bodů a odečtení jejich souřadnic jak z podkladu, tak z radarového snímku byl vypočten posun snímku, případně rotace či změna měřítka. Kromě těchto hodnot byla spočítána směrodatná σ a mezní směrodatná odchylka mez_{σ_p} posunů ve směru zeměpisné šířky a délky.

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{n-1}} \quad (6.1)$$

$$mez_{\sigma_p} = 2 \cdot \sigma_p \quad (6.2)$$

kde x_i jsou rozdíly mezi snímkem a podkladem, x je průměrná hodnota rozdílů a n je počet hodnot.

V následující tabulce můžeme pozorovat rozdíly v jednotlivých souřadnicích při zpracování zadaných, neopravených dat.

	06050		11561		25432	
	U [m]	V [m]	U [m]	V [m]	U [m]	V [m]
Posun	-175	-1153	-115	-1248	-5650	1918
σ_p	41	142	45	119	78	378
mez_{σ_p}	81	284	89	237	157	757

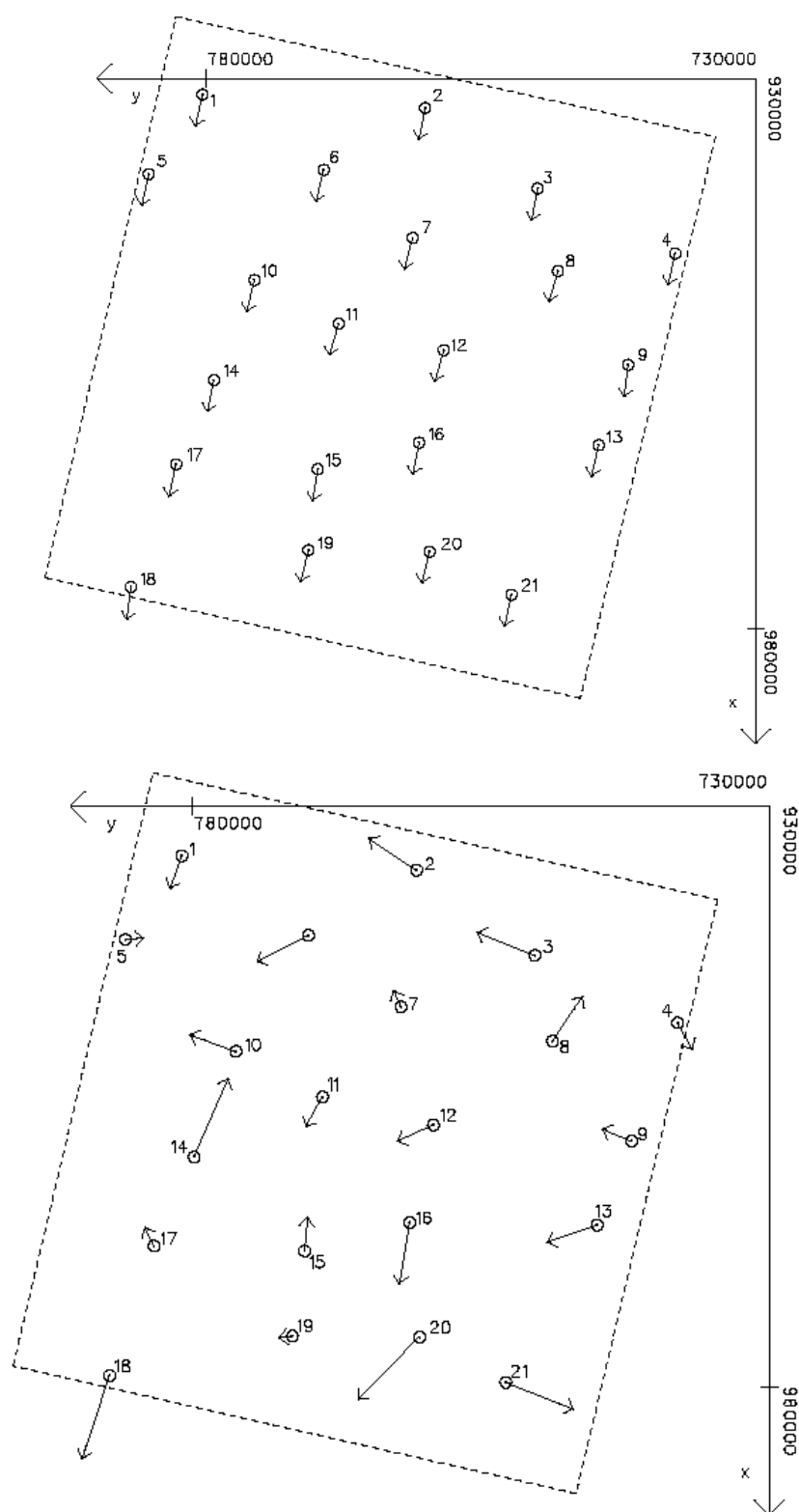
Tabulka 5.2. Posuny a jejich odchylky

Tyto posuny jsme nejprve museli rozdělit na posun ve směru letu družice a ve směru kolmém. Posun ve směru letu družice odstraníme změnou časů. V příloze... máme řádky, které měníme, označeny. Všechny časy posouváme o stejnou hodnotu – intervaly mezi začátkem, středem a koncem časování musí být stejné. Při odstranění příčného posunu měníme pozici jednotlivých vektorů také o stejnou hodnotu, jinak by došlo k deformaci snímku.

Po opravení dráhy následuje opakování celého postupu, dokud nejsou posuny menší než jejich mezní směrodatné odchylky.

5.4 Vyhodnocení jednotlivých drah družic:

5.4.1 25432:



Obrázek 5.3 25432 Vektory posunů a) před b) po opravě

Na obr. 5.3a) je jejich velikost ve stejném měřítku, jako je snímek. Pro představu uvádím, že velikost vektorů posunu je kolem 5800 m. Všechny vektory jsou přibližně stejného směru a to ve směru letu družice. Z obrázku je celkem jasný posun snímku.

Na obr. 5.3b) je velikost vektorů posunu zvětšena 200x, jinak by byly v takovéto velikosti zobrazeny téměř jako body. Jejich průměrná velikost je zhruba 40 m. Vektory už nejsou stejného směru ani stejné velikosti. Z toho můžeme odvodit, že snímek není jednoznačně posunut, rotován, nebo deformován. Z výsledných hodnot nám vychází, že je posun menší než jeho směrodatná odchylka. Proto už nebyl další posun proveden.

25432	Před opravou		Po opravě	
	U [m]	V [m]	U [m]	V [m]
Posun	-5650	1918	-4	19
σ_p	78	378	33	45
mez_{σ_p}	157	757	67	91

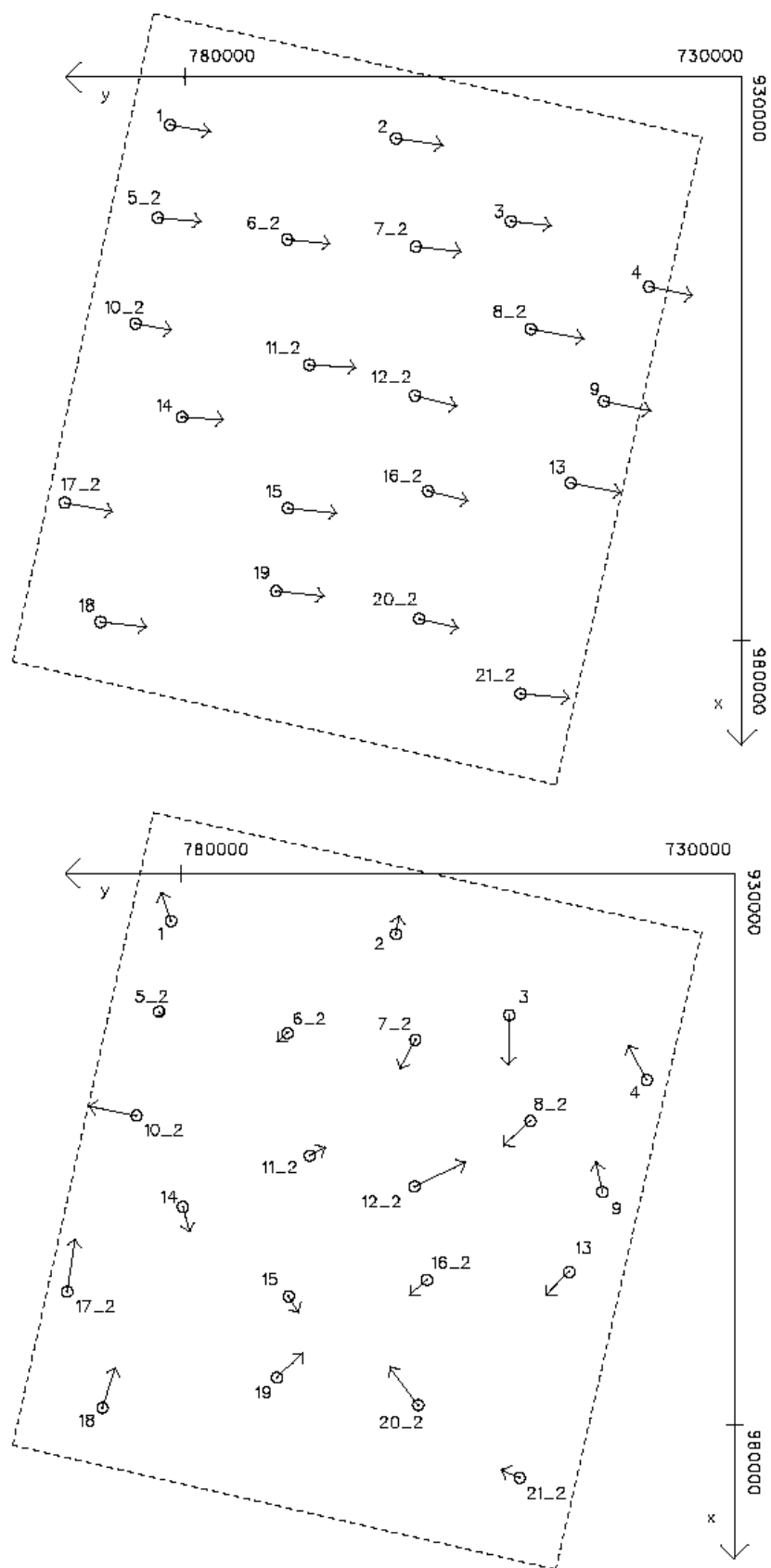
Tabulka 5.3. Rozdíly snímků a mapy před a po opravě

U [m]	V [m]	změna ve směru letu	změna ve směru $\perp$	změna v časování	změna v poloze
5646 m	-1899 m	5772 m	0 m	0,8689 s	0 m

Tabulka 5.4. Provedený posun

V tab. 5.4. je provedený posun vyjádřen 3 způsoby. Nejprve klasickým způsobem jako posun v zeměpisných souřadnicích, poté jako posun ve směru letu družice a ve směru kolmém, a nakonec je pro představu vyjádřen změnou protokolu v zadaných datech.

5.4.2 11561:



Obrázek 5.4 11561 Vektory posunů a) před b) po opravě

Protože jsou na tomto snímku posuny menší, než na snímku předchozím, byly pro lepší názornost i tyto základní posuny 10x zvětšeny. Jejich velikost se pohybuje kolem 800 m. Na obr. 5.4a) můžeme pozorovat směr hlavního posunu. Na rozdíl od předchozího bude nejen ve směru dráhy družice, ale hlavně ve směru kolmém.

Na obr. 5.4b) je opět velikost vektorů posunu zvětšena 200x. Jejich průměrná hodnota je 29 m. Znovu můžeme z obrázku vyvodit, že další posun není nutný.

11561	Před opravou		Po opravě	
	U [m]	V [m]	U [m]	V [m]
Posun	-115	-1248	3	12
σ_p	45	119	25	28
mez_{σ_p}	89	237	51	56

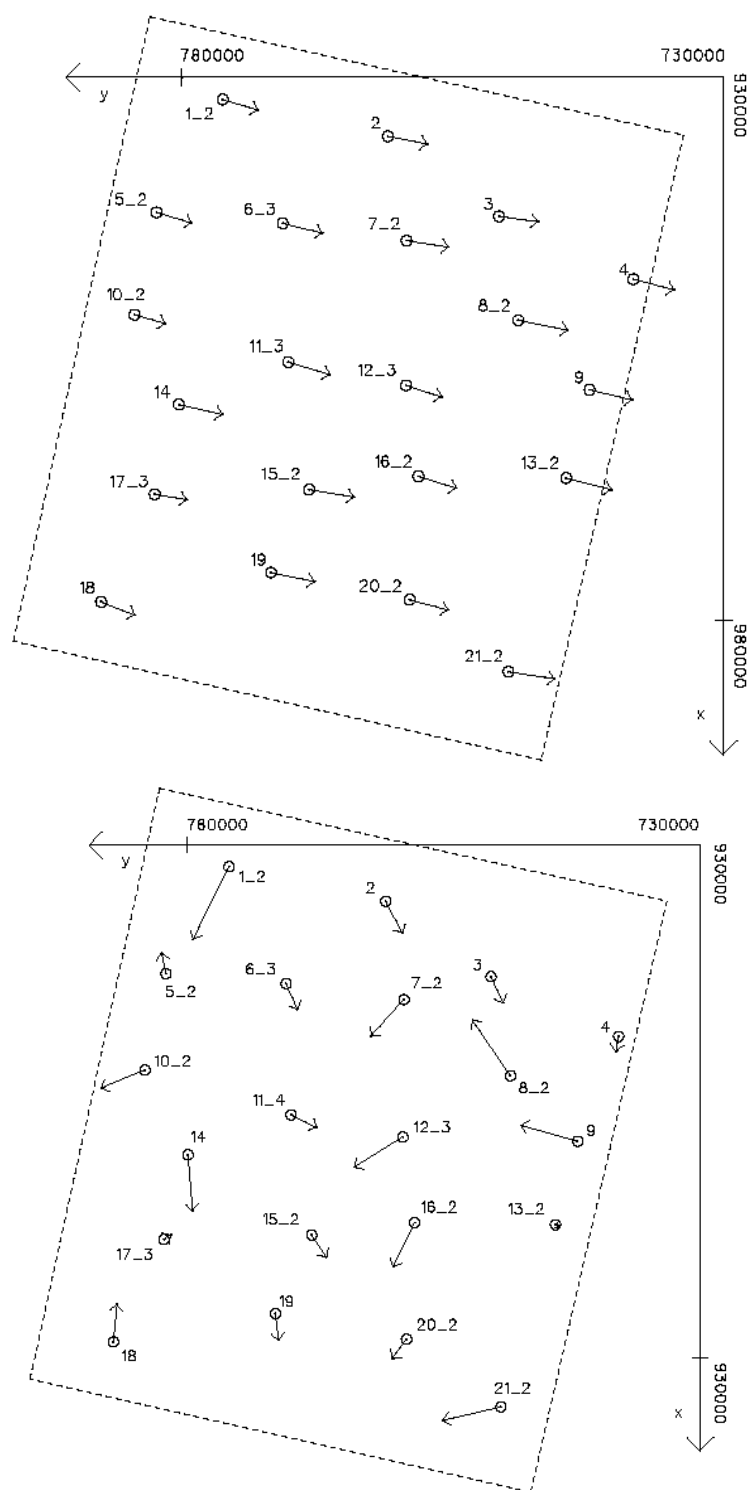
Tabulka 5.5. Rozdíly snímků a mapy před a po opravě

U [m]	V [m]	změna ve směru letu	změna ve směru $\perp$	změna v časování	změna v poloze
118 m	1260 m	32 m	795 m	0,004482 s	-162,4867 m

Tabulka 5.6. Provedený posun

5.4.3 06050:

Posuny v následujících obr. 5.5 jsou velikostně podobné jako u orbity 11561. Jejich velikosti jsou také 10x a 200x zvětšeny. Průměrné hodnoty v a) a b) jsou 753 m a 37 m. Posun je proveden opět dominantní ve směru kolmém na dráhu družice. O důvodu vzniku těchto chyb je pojednáno v zhodnocení.



Obrázek 5.5 06050 a) před posunem, b) po posunu

06050	Před opravou		Po opravě	
	U [m]	V [m]	U [m]	V [m]
Posun	-175	-1153	-15	18
σ_p	41	142	29	40
mez_{σ_p}	81	284	59	79

Tabulka 5.7. Rozdíly snímků a mapy před a po opravě

U [m]	V [m]	změna ve směru letu	změna ve směru $\perp$	změna v časování	změna v poloze
159 m	1163 m	748 m	41 m	0,004482 s	-160,0611 m

Tabulka 5.8. Provedený posun

5.5 Zhodnocení

V této kapitole jsem se věnovala konkrétnímu zpracování zadaných dat a jejich grafickému znázornění. Na každém obrázku můžeme pozorovat směr a velikost posunů (pro lepší grafické znázornění jsou až na obr. 5.3a) u orbity 25432 zvětšené). Součástí zpracování jsou také stručné tabulky obsahující rozdíly jednotlivých vytvořených snímků s mapou (Google Earth) před a po opravě. Celé tabulky s kompletními daty jsou součástí přílohy. Poslední část představují tabulky s konečným posunem pro představu vyjádřené třemi způsoby.

Nejvýraznější chyba byla u orbity 25432. Činila necelých 6 km. Její směrodatné odchylky v zeměpisné šířce a délce byly 78 m a 378 m. Posun byl ve směru letu družice. Pro opravení této chyby muselo být pozměněno časování. Jak lze z tab. 5.4. vyčíst, 9 desetin vteřiny představuje chybu téměř 6 km. Po opravě se zmenšil rozdíl mezi snímkem a mapou na -4 m v zeměpisné šířce a 19 m v zeměpisné délce. Směrodatné odchylky těchto hodnot byly několikanásobně větší, takže další posun nebyl proveden. Také na obr. 5.3 si můžeme všimnout, že vektory mají různé velikosti a směry z kterých nelze vyčíst ani posun, rotace, či nějaká deformace.

U orbit 11561 a 06050 byly hodnoty rozdílů přibližně podobné. Jejich posuny byly kolem 1200 m a i jejich směrodatné odchylky byly menší než u předchozí orbity. U těchto snímků byl hlavní posun ve směru kolmém na dráhu družice. Pro opravení této chyby se pozměňovaly polohové vektory *state_vector_position*. Posun ve směru letu družice byl řádově v desítkách metrů. Představoval tisíce vteřiny. Pro opravení družicových parametrů o tyto chyby byly hodnoty rozdílů a jejich směrodatných odchylek obdobné jako u orbity 25432.

Z provádění oprav můžeme usoudit, že chyby ve směru dráhy družice jsou závislé na časování, proto je jejich vznik chybou právě časování. Zatímco chyby radiální jsou závislé na poloze state-vektorů, jejichž přesnost může být ovlivněna více faktory.

K určení polohy dráhy družice slouží mimo jiné model průběhu geoidu, který se stále zpřesňuje. Proto, když se chyba kolmá na směr letu objevila pouze u orbit z let 1992 a 1993, směřovala má první myšlenka k nepřesnému modelu. Ale tato chyba by se projevila i na ostatních orbitách, takže myšlenka byla zavržena. Další způsob špatného určení polohy by mohla být chyba odečtení altimetru, nebo špatné určení ostatních vlivů působících jak na družici, nebo na vyslaný paprsek (gravitační pole Země, přímý a nepřímý vliv Slunce, Měsíce, ostatních planet, odpor atmosféry, tlak slunečního záření...). Také roční období by mohlo mít na určení okolních vlivů svou zásluhu.

Kapitola 6

Závěr

Když se rozhlédneme kolem sebe, můžeme si všimnout neustále se vyvíjející techniky. A tak je to i s vědou zabývající se umělými družicemi Země. Není to tak dlouho, co byla první družice vysazena na oběžnou dráhu a dnes už jsme schopni mapovat i ostatní planety sluneční soustavy.

Základem úspěchu použití dat z družice je znalost její dráhy. Na let družice působí spousta gravitačních i negravitačních vlivů a proto je výpočet a odstranění těchto vlivů velmi náročný proces. V neposlední řadě působí na družice gravitační pole Země, jehož přesný průběh neznáme. Z počátku se k výpočtu dráhy používaly nepřesné modely průběhu geoidu. Dnes je situace opačná a k vytvoření modelů geoidu používáme data z družic.

Družice nese řadu přístrojů, díky nimž jsme schopni určit atmosférické podmínky a hlavně polohu. Mezi ně patří i družicový altimetr, kterým byla zjištěna poloha u zadaných orbit. Nejprve byl využíván pouze k mapování oceánů a určení průběhu geoidu. Data z pobřeží a z pevniny jsme nebyli schopni zpracovat. Dnes už jsme schopni díky novým softwarům využít i tyto hodnoty.

I přes výborné programy nejsme schopni komplexně opravit všechny snímky. Právě takovéto „chybné“ orbity mi byly poskytnuty k opravě. Chyby se vyskytovaly jak v časování, tak v určení polohy state-vektorů. Po zpracování a georeferencování těchto dat byly odchylky od skutečnosti řádově kilometrové. Chyby byly rozděleny na chybu ve směru dráhy družice a na radiální, která je na směr letu kolmá. První byla přisouzena chybě v časování. Druhá mohla být způsobena špatným určením parametrů okolních vlivů na družici.

I po opravení byly rozdíly od skutečnosti v řádu metrů, což je pořád nedostačující. K dalšímu zpřesnění bychom museli vzniklé snímky rozdělit na části a

ty samostatně upravovat. Při zpracování bych však nedoporučovala metodu použitou v této práci, protože identifikace bodů na snímku není jednoznačná a přesnost odečtení bodů se pohybuje v řádu desítek metrů.

Opravené orbity dále postupují do interferometrie, která je schopna z těchto dat vytvořit digitální modely terénu. Tyto DEM mohou sloužit k topografickému mapování, k sledování deformací, tématickému mapování nebo monitorování atmosférického zpoždění.

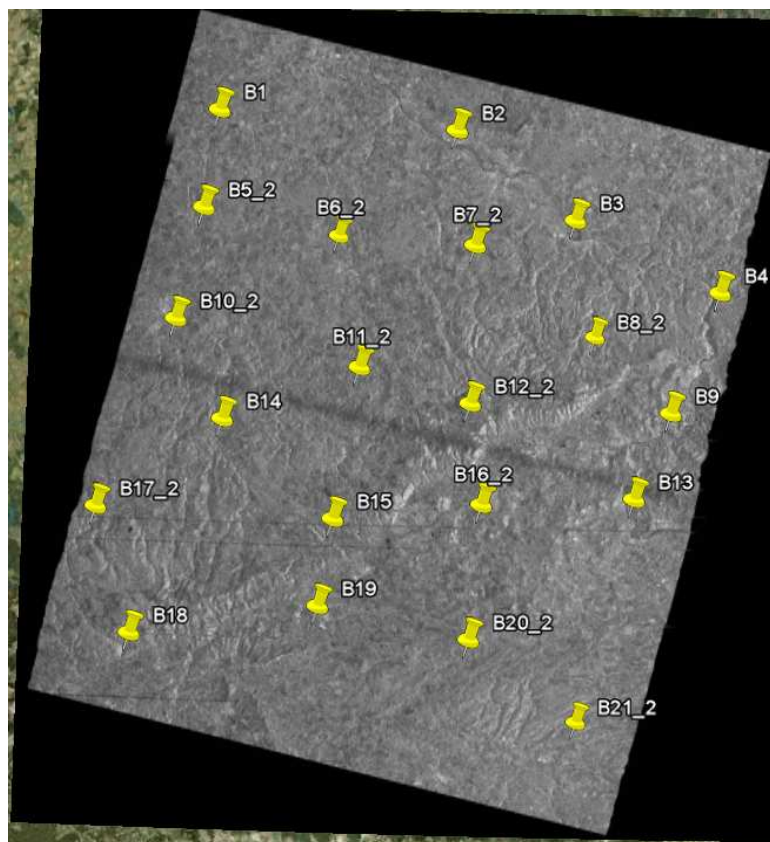
Závěrem bych chtěla říci, že zpracováváním družicových dat vzniká široká škála informací, které jsme rok od roku schopni lépe zpracovat a využít. Neměli bychom však podceňovat počasí a okolní vlivy, které mají obrovský význam při vyhodnocování.

Literatura

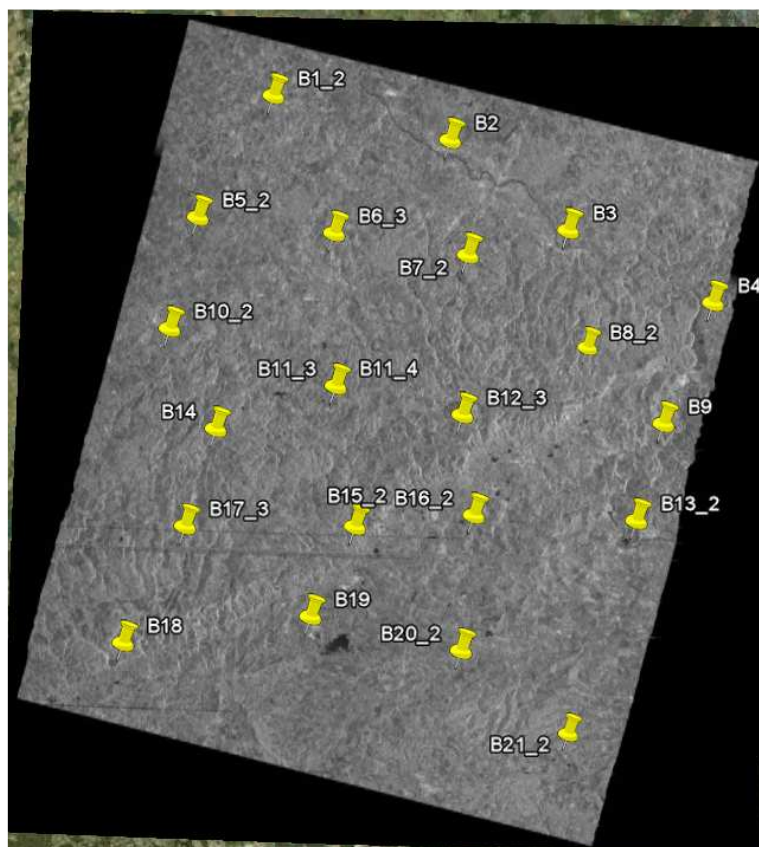
- [1] ČAPKOVÁ IVANA, *Radarová interferometrie : chyby v georeferencování*
<http://www.insar.cz/pgs/fdpz05.pdf>
- [2] ČAPKOVÁ IVANA, *Satelite Orbit Errors and Their Influence on Interferograms : Diploma Thesis – ČVUT v Praze*, 2005
- [3] EUROPEAN SPACE AGENCY, *ERS overview*, <http://www.esa.int/>
- [4] GISAT, *Informace o gisat*, <http://www.gisat.cz>
- [5] GLCF, *Global Land Cover Facility*, <http://glcf.umiacs.umd.edu/data/srtm/>
- [6] HALOUNOVÁ, L. & PAVELKA, K., *Dálkový průzkum Země*, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005
- [7] HANNSEN, R., *Radar interferometry*, Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2001
- [8] JET PROPULSION LABORATORY, *Shuttle Radar Topography Mission*,
<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
- [9] KLOKOČNÍK JAROSLAV, *Družicová altimetrie a její geoaplikace : habilitační práce*, ČVUT v Praze, 2000
- [10] KNECHTLOVÁ BARBORA, *Diplomová práce - Porovnání DEM vypočtených z různých tandem párů*, ČVUT v Praze, 2007
- [11] KOSMICKÁ GEODÉZIE, *budoucí skripta*, <http://gama.fsv.cvut.cz/~k152/>
- [12] KAMPES, B. & HANNSEN, R., *Cookbook - Radar Interferometric Processing with DORIS*, Delft University of Technology, 2006
- [13] NASA, *Shuttle Radar Topography Mission*, <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm>
- [14] WIKIPEDIE, *Otevřená encyklopedie*, <http://cs.wikipedia.org/>
- [15] PORTÁL CENTRUM, *Mapy portálu Centrum*, <http://supermapy.atlas.cz/>
- [16] PORTÁL SEZNAM, *Encyklopedie portálu Seznam*,
- [17] <http://encyklopedie.seznam.cz/>
- [18] PORTÁL SEZNAM, *Mapy portálu Seznam*, <http://mapy.cz/>
RADAROVÁ INTERFEROMETRIE, *Diplomové práce*, <http://www.insar.cz/>

- [19] VÚGTK, *Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický*,
<http://www.vugtk.cz/>
- [20] THE MATHWORKS, *MATLAB – The Language of Technical Computing*,
<http://www.mathworks.com/>
- [21] ZEMĚMĚŘIČ, *Časopis a server o geodézii, kartografii, katastru nemovitostí, GIS, GPS, DPZ, a PÚ*, <http://www.zememeric.cz/>

Přílohy



Obrázek P.1 Rozmístění bodů pro snímek 11561



Obrázek P.2 Rozmístění bodů pro snímek 06050

ČB	reálné		snímek			
			původní		1. posun	
	U [°]	V [°]	U [°]	V [°]	U [°]	V [°]
1	51,117979	13,035979	51,169005	13,052876	51,117787	13,036351
2	51,096368	13,604110	51,147045	13,619152	51,096205	13,604914
3	50,964455	13,890660	51,015676	13,905046	50,964483	13,891265
4	50,859678	14,237590	50,909720	14,254767	50,859508	14,238443
5	50,988621	12,899249	51,039119	12,916782	50,988515	12,899733
6	50,995160	13,342251	51,046110	13,361834	50,995010	13,343003
7	50,884593	13,567286	50,934983	13,587236	50,884495	13,567241
8	50,831784	13,934673	50,881026	13,956941	50,831324	13,935228
9	50,676904	14,125417	50,728279	14,135771	50,676888	14,125788
10	50,815742	13,166962	50,866518	13,184941	50,815429	13,167173
11	50,745024	13,376533	50,795337	13,399572	50,745211	13,376667
12	50,701512	13,645036	50,751857	13,666405	50,701627	13,644375
13	50,546653	14,042197	50,597145	14,060577	50,546119	14,042897
14	50,652723	13,066130	50,703146	13,082704	50,651984	13,065944
15	50,506996	13,333683	50,558426	13,346251	50,507279	13,334130
16	50,550086	13,588055	50,601291	13,603993	50,550152	13,587629
17	50,514459	12,968524	50,565497	12,986104	50,514143	12,968871
18_2	50,313397	12,861072	50,366231	12,871323	50,314110	12,861634
19	50,374997	13,303813	50,425976	13,322468	50,375232	13,303914
20	50,372917	13,611466	50,423451	13,630877	50,373370	13,612343
21	50,302892	13,821721	50,352954	13,838624	50,302980	13,822057
					50,303097	13,820900

Tabulka P.1. Odečtené souřadnice bodů zpracované snímky orbity 25432

	snímek					
	původní		1. posun		2. posun	
	U [m]	V [m]	U [m]	V [m]	U [m]	V [m]
Posun:	-5650	1918	6	38	-4	19
Směrodatná odchylka:	78	378	37	46	33	45
Mezní směrodatná odchylka:	157	757	74	92	67	91

Tabulka P.2. Rozdíly mezi mapou z Google Earth a snímky orbity 25432

	snímek					
	původní		1. posun		2. posun	
	U [m]	V [m]	U [m]	V [m]	U [m]	V [m]
Posun:	-115	-1248	9	20	3	12
Směrodatná odchylka:	45	119	24	58	25	28
Mezní směrodatná odchylka:	89	237	48	116	51	56

Tabulka P.4. Rozdíly mezi mapou z Google Earth a snímky orbity 11561

ČB	reálné		snímek					
			původní		1. posun		2. posun	
	U [°]	V [°]	U [°]	V [°]	U [°]	V [°]	U [°]	V [°]
1 2	51,156714	13,177159	51,158436	13,168027	51,157350	13,177645	51,157350	13,177645
2	51,096368	13,604110	51,097639	13,593818	51,096645	13,603880	51,096645	13,603880
3	50,964455	13,890660	50,965367	13,880528	50,964683	13,890492	50,964683	13,890492
4	50,859678	14,237590	50,861419	14,227008	50,859806	14,237624	50,859806	14,237624
5 2	50,970112	13,006138	50,971880	12,997211	50,969932	13,006197	50,969932	13,006197
6 3	50,952081	13,333211	50,953684	13,322918	50,952305	13,333054	50,952305	13,333054
7 2	50,924060	13,653180	50,925123	13,642252	50,924380	13,653626	50,924380	13,653626
8 2	50,791862	13,943104	50,793482	13,930251	50,791377	13,943619	50,791377	13,943619
9	50,676904	14,125417	50,678578	14,114349	50,676766	14,126181	50,676766	14,126181
10 2	50,801281	12,948263	50,802751	12,940167	50,801439	12,948857	50,801439	12,948857
11 3	50,722413	13,347933	50,724478	13,337069	50,722862	13,346043		
11 4	50,722751	13,346395					50,722862	13,346043
12 3	50,683898	13,649977	50,685788	13,640718	50,684162	13,650632	50,684162	13,650632
13 2	50,530702	14,065830	50,532590	14,054087	50,530718	14,065786	50,530718	14,065786
14	50,652723	13,066130	50,654369	13,054806	50,653214	13,066066	50,653214	13,066066
15 2	50,512266	13,402767	50,513493	13,391145	50,512458	13,402565	50,512458	13,402565
16 2	50,533729	13,682539	50,535722	13,672646	50,534112	13,682832	50,534112	13,682832
17 3	50,504913	13,000706	50,505808	12,992337	50,504873	13,000613	50,504873	13,000613
18	50,325910	12,863016	50,328099	12,854265	50,325582	12,862964	50,325582	12,862964
19	50,374997	13,303813	50,376494	13,292446	50,375230	13,303768	50,375230	13,303768
20 2	50,330068	13,660155	50,331783	13,650149	50,330240	13,660349	50,330240	13,660349
21 2	50,211563	13,916546	50,212762	13,904507	50,211680	13,917330	50,211680	13,917330

Tabulka P.5. Odečtené souřadnice bodů zpracované snímky orbity 06050

	snímek					
	původní		1. posun		2. posun	
	U [m]	V [m]	U [m]	V [m]	U [m]	V [m]
Posun:	-175	-1153	22	-14	-15	18
Směrodatná odchylka:	41	142	32	41	29	40
Mezní směrodatná odchylka:	81	284	64	82	58	79

Tabulka P.6. Rozdíly mezi mapou z Google Earth a snímky orbity 06050