národní
úložiště
šedé
literatury

Ověřená technologie využití satelitního InSAR pro určování deformací povrchu Země : výzkumný záměr : (č.ú.1.5/2011): dokumentace

Böhm, Ondřej; Talich, Milan

Dostupný z http://www.nusl.cz/ntk/nusl-201198

Dílo je chráněno podle autorského zákona č. 121/2000 Sb.

Tento dokument byl stažen z Národního úložiště šedé literatury (NUŠL).

Datum stažení: 19.04.2024

Další dokumenty můžete najít prostřednictvím vyhledávacího rozhraní nusl.cz .

Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický

Výzkumný záměr
úkol I.5/2011

Ověřená technologie využití satelitního InSAR pro určování deformací povrchu Země

Ing. Ondřej Böhm

Ing. Milan Talich, Ph.D.

dokumentace

prosinec 2011

1 Úvod

Radary a jimi pořízená data jsou důležitými zdroji informací v mnoha oborech lidské činnosti. Jednou z nich je dálkový průzkum Země, kde radary přinášejí unikátní vlastnosti a doplňují tak ostatní zdroje dat. Velkou výhodou radarů je jejich nezávislost na externích zdrojích záření (jedná se o aktivní senzory) a na meteorologických podmínkách (radarové záření prostupuje oblačností).

Navíc z principu technologie je možné zaznamenávat kromě intenzity také fázi odraženého záření. Tuto informaci o fázi lze s úspěchem využít při tvorbě digitálního modelu terénu a při detekcí deformací, posunů apod. V této zprávě bude popsána technologie získání informací o deformacích povrchu Země ze snímků SAR, tedy radarů se syntetickou aperturou.

2 SAR

SAR je zkratka anglického Synthetic Aperture Radar neboli radar se syntetickou aperturou. Jedná se o radarový senzor napojený na počítač vybavený speciálními výpočetními postupy. Tato aparatura je umístěna na pohyblivém nosiči (typicky satelit nebo letadlo). Během pohybu nosiče radar kontinuálně snímá zemský povrch a všechna data z určitého časového úseku jsou v počítači zkombinována do jediného "snímku" s využitím Dopplerova principu. Pohyb nosiče tak simuluje velmi velkou aperturu radarového senzoru (odtud termín syntetická apertura) (viz obr. 1). Tím je docíleno řádově lepšího rozlišení takového snímku oproti radarům s reálnou aperturou (v desítkách metrů oproti stovkám metrů pro radary umístěné na družicích, viz tab. 1).

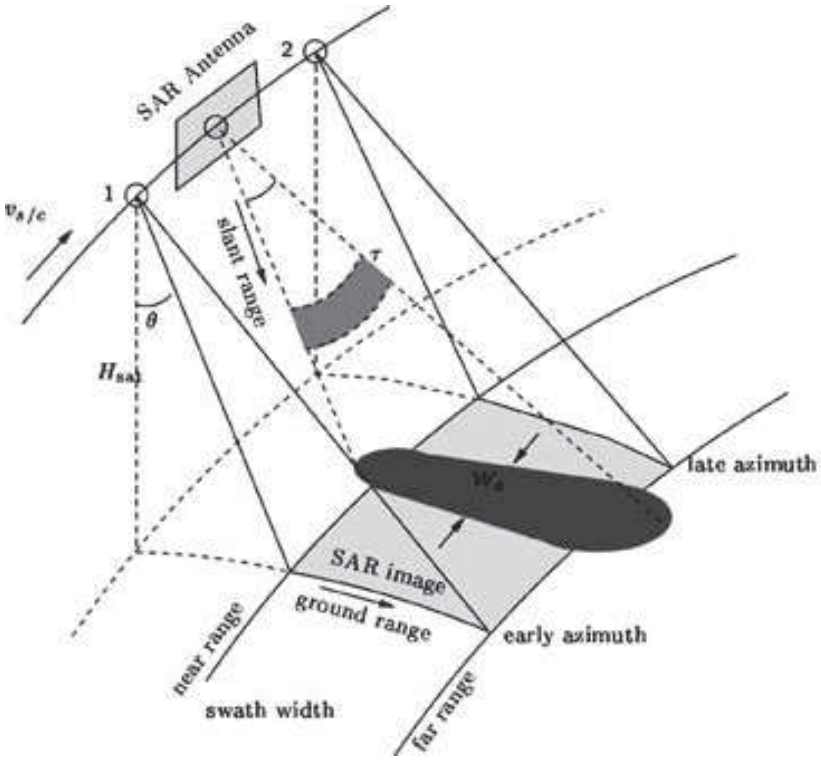
Odražené záření je ukládáno ve formě komplexních čísel, tzv. *fázorů.* Ty lze interpretovat jako *amplitudu* a *fázi* nosné vlny podle:

$$\begin{aligned} y_1 &= |y_1|\, exp\,(j\psi_1) \\ y_2 &= |y_2|\, exp\,(j\psi_2) \end{aligned} \tag{1}$$

Prakticky se data ukládají jako tzv. *I/Q data*, kde I je reálná složka a Q *je imaginární* složka komplexního čísla. *Amplituda* se využívá pro konstrukci radarového obrazu a v různých aplikacích jako radarová stereoskopie. V případě samostatného snímku je to jediná využitelná informace, fáze má totiž rovnoměrné rozložení pravděpodobnosti a jeví se tudíž jako náhodný šum. Protože SAR data obsahují komplexní čísla, nazývají se někdy také komplexní snímky.

3 Princip InSAR

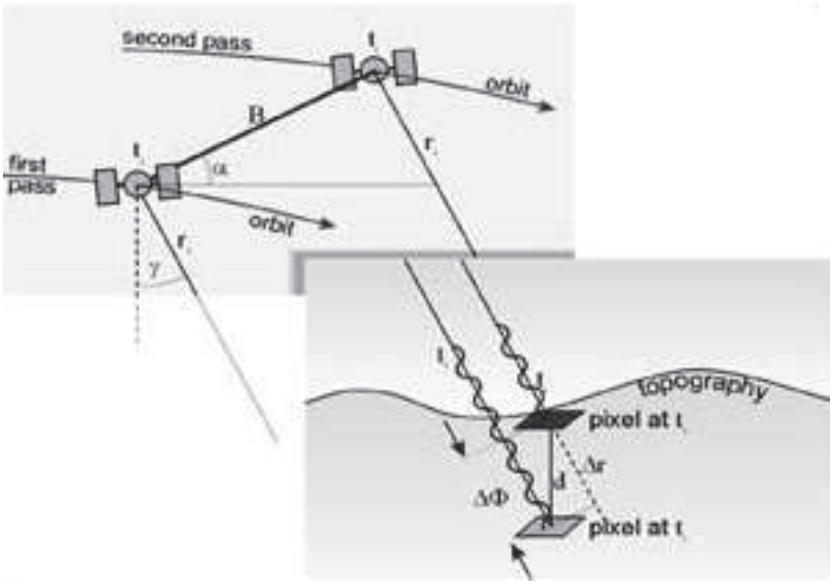
InSAR (Interferometry SAR) je způsob využití nadbytečné informace v SAR datech - fáze. Jak bylo řečeno v předchozím odstavci, fázi samostatného snímku nelze využít. Pokud ale zkombinujeme dva a více snímků můžeme z rozdílů fáze odvodit model terénu a/nebo deformace území.



Obrázek 1: Geometrie SAR snímku (převzato z [2])

družice	ERS-1	ERS-2	ENVISAT	JERS-1	RADARSAT
provozovatel	ESA	ESA	ESA	Japonsko	Kanada
začátek mise	1991	1995	2002	1992	1995
rozlišení snímku [m]	25	25	30-1000	25	10-100
šířka záběru [km]	100	100	60-405	75	45-500
vlnová délka	5,6 cm	5,6 cm	5,6 cm	23,5 cm	5,7 cm

Tabulka 1: Parametry družic vybavených SAR



Obrázek 2: schéma InSAR (převzato z [2])

Základní princip metody spočívá ve vytvoření komplexního interferogramu. Ten vznikne komplexně sdruženým násobením (pixel po pixelu) zdrojových SAR snímků. Vnikne tak nový snímek pro jehož hodnoty platí:

$$y_1 y_2^* = |y_1| exp\left(j\psi_1\right) |y_2| exp\left(-j\psi_2\right) = |y_1||y_2| exp\left(j\left(\psi_1 - \psi_2\right)\right) \tag{2}$$

kde:

y_1,y_2 jsou fázory na příslušné pozici v prvním a druhém snímku

y_2^* je komplexně sdružené číslo k y_2

ψ_1,ψ_2 jsou fáze na příslušné pozici v prvním a druhém snímku

Pixely interferogramu tedy mají amplitudu rovnou součinu původních amplitud a fázi rovnou rozdílu fází zdrojových snímků. Hlavní význam má právě fáze $\phi_p = \psi_1 - \psi_2$, nazývaná *interferometrická fáze*. Princip využití fáze v interferometrii je schématicky znázorněn na obrázku 2.

Pro interferometrickou fázi ϕ_p, převýšení H_p a posun D_p pixelu P platí následující vztah (odvození viz např. [1]):

$$\phi_p = \frac{4\pi}{\lambda}\left(B\sin\left(\theta_p^0 - \alpha\right) - D_p - \frac{B_{\perp,p}^0}{R_1 \sin\theta^0} H_p\right) \tag{3}$$

kde (viz obr. 2):

λ je vlnová délka radarového záření

B	je prostorová základna
$B^0_{\perp,p}$	je kolmá prostorová základna
θ^0_p	úhel pohledu antény pro bod P
θ^0	úhel pohledu antény pro bod na referenčním tělese
α	úhel mezi prostorovou základnou a rovinou horizontu

Pokud vezmeme např. družici ERS, vyplývá ze vzorce (3), že velikosti převýšení 1m odpovídá interferometrická fáze cca 4,5 stupně. To je hodnota, kterou je kvůli úrovni šumu ve snímku (zhruba 40 stupňů) prakticky nemožné detekovat. Proto je také přesnost radarové interferometrie pro účely určování převýšení 10-50m.

Naproti tomu již posun o velikosti 1cm způsobí změnu fáze o velikosti 127 stupňů, kterou lze snadno rozpoznat. Proto je radarová interferometrie tak zajímavá pro určování deformací. Umožňuje totiž jejich určení s vysokou přesností.

Dva SAR snímky z kterých interferogram vzniká mohou být pořízeny ve stejný čas (dva radarové senzory na jednom nosiči) nebo v různých časech (tzv. *repeat-pass interferometry* - snímky jsou pořízeny z jedné družice při jejím opakovaném přeletu nad zájmovým územím. Principiálně se tedy snímky od sebe mohou lišit polohou (mluvíme o *polohové základně*) a časem pořízení (tzv. *časová základna*). Pro určování modelů terénu je ideální první případ, odpadne totiž možný vliv deformace území na interferogram. Naopak pro určování deformací je pochopitelně využitelný pouze druhý případ. Poněkud nešťastné je, že polohová základna je i v tomto případě nenulová a interferogram tedy vyjadřuje jak model terénu tak deformace (viz. rovnice (3)). Vliv tvaru terénu je tedy třeba nějakým způsobem vyloučit. Možností je víc, jednou z nich je diferenční interferometrie popsaná v odstavci 5.

Interferogram se obvykle znázorňuje jako barevný obraz, kde hodnotám interferometrické fáze přiřadíme určitou barevnou hodnotu. Barevný přechod přes celé barevné spektrum tvoří tzv. interferometrické proužky (fringe). Pro každé dva body interferogramu vyjadřuje počet interferometrických proužků mezi nimi vzájemné převýšení (příp. vzájemný posun) o velikosti poloviny vlnové délky radaru.

Pokud předpokládáme, že nedošlo k žádným deformacím, zbyde nám v rovnici (3) pouze člen vyjadřujícím vliv modelu terénu. Důležitým číslem je pak výšková ambiguita - výška, která odpovídá změně interferometrické fáze o 2π. Pro výškovou ambiguitu platí vztah:

$$h_a = \frac{\lambda R sin\theta}{2B_n} \tag{4}$$

kde B_n je délka kolmé prostorové základny. Teoreticky z rovnice (4) vyplývá, že čím je kolmá základna delší, tím je výsledný model terénu přesnější. Ve skutečnosti to platí jen po určitou mez - při příliš velké základně jsou snímky nekorelované a interferogram nemá žádnou vypovídací hodnotu (nedoje k vytvoření interferometrických proužků). Tato kritická velikost základny závisí na

konfiguraci satelitů. Z uvedeného vyplývá, že pro každý satelit existuje ideální délka kolmé základny pro tvorbu modelu terénu. Pro satelit ERS se pohybuje v intervalu 300-400 metrů.

Pro účely deformací je naopak vhodné aby byla prostorová základna co nejmenší. Teoreticky by při nulové základně vliv tvaru terénu z rovnice (3) zcela vypadl, ale v praxi takový případ nenastává.

3.1 Hodnocení kvality výstupu

Pro hodnocení kvality a použitelnosti výsledného interferogramu se používají mapy koherence. Ty zobrazují lokální koherenci, což je korelační koeficient pro malou část snímků interferometrického páru. Tento korelační koeficient se spočítá pro každý pixel snímků (pomocí pohyblivého okna nad snímky). Korelační koeficient nabírá hodnot od 0 do 1 a lze jej interpretovat jako nový obraz o stejném rozměru jako interferogram - tzv. koherenční mapu. Oblasti s vysokou koherencí, tj. oblasti kde je interferogram kvalitní, protože je málo zatížen šumem, se v koherenční mapě zobrazí jako světlé oblasti. Naopak části interferogramu, kde je koherence malá a kde je tedy vysoká úroveň dekorelace se zobrazí tmavou barvou.

Koherenční mapy tedy poskytují vizuální přehled o kvalitě interferogramu. Zároveň jsou důležité pro rozbalení fáze, jsou totiž jedním ze vstupních údajů programu pro rozbalení fáze SNAPHU (viz kap. 6.6).

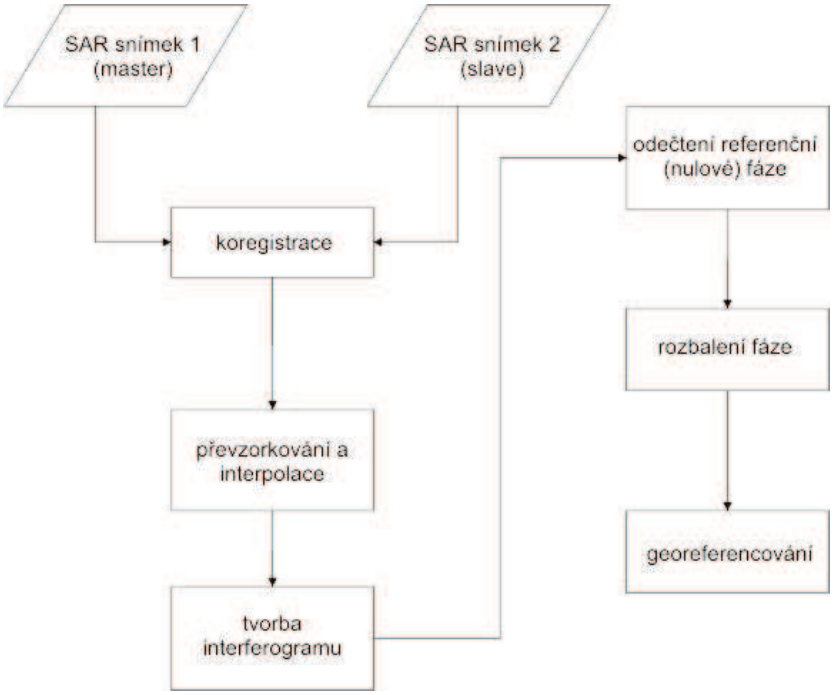
4 Tvorba a vyhodnocení interferogramu

Vytvoření interferogramu a lokalizovaných výstupů probíhá v několika krocích. Jako vstupní data lze použít komplexní SAR snímky ("single look complex", SLC) poskytované provozovatelem dané družice. Je také možné použít přímo surová měření. Ta je ale samozřejmě nutné nejprve zaostřit ("image focusing"). To je někdy výhodnější, protože taková data bývají levnější, bývají dříve k dispozici a vyloučí se tak případné použití různých zaostřovacích postupů v různých zpracovatelských centrech. Obrázek 3 ukazuje postup tvorby a vyhodnocení interferogramu (výchozími daty jsou SLC snímky).

Uvedený postup platí pro nejjednodušší případ zpracování a vyhodnocení pouze dvou snímků. U složitějších případů se mohou v postupu vyskytovat další kroky.

4.1 Koregistrace

Aby bylo možno ze dvou SAR snímku vytvořit interferogram, je třeba nejprve zajistit aby snímky měly stejnou velikost a aby každý pixel zobrazoval v obou snímcích stejné území. Tento proces se nazývá *koregistrace* a spočívá v odstranění vzájemných posunů snímků a v převzorkování jednoho ze snímků, aby se dosáhlo stejné velikosti pixelů. Při koregistraci zvolíme jeden ze snímků jako referenční (*master*) a druhý snímek (*slave*) se snažíme s tímto referenčním snímkem



Obrázek 3: Obecný postup zpracování SAR snímků pro interferometrii

ztotožnit.

Koregistrace je velmi důležitým krokem zpracování a je třeba ji provést se subpixelovou přesností. Obvykle se provádí ve dvou krocích: nejprve se provede hrubá koregistrace s přesností několika pixelů a pak následuje přesná koregistrace již se subpixelovou přesností.

Pro hrubou koregistraci je možné využít přesné údaje o dráze satelitu, spočítat transformaci na základě ručně definovaných identických bodů, nebo použít georeferenční údaje, které jsou součástí dat (jako např u SLC snímků produkovaných ESA). Tato transformace ale není pro účely tvorby interferogramu dostačující. Je třeba provést ještě přesnou koregistraci.

Přesná koregistrace se obvykle provádí pomocí korelačních technik. Z hrubé koregistrace je známá přibližná pozice identických bodů v obou snímcích. Zvolí se *korelační okno* - okolí těchto identických bodů o dané velikosti (např. 100 x 100 pixelů) a spočítá se korelace těchto dvou oken. Maximum korelace indikuje posun (zpřesnění polohy) daného bodu. Tento postup se iterativně opakuje dokud není posun dostatečně malý nebo dokud neproběhne stanovený počet iterací.

Pro výpočet korelace lze použít celá komplexní data (tyto koregistrační metody se nazývají koherentní metody) nebo pouze amplitudu či fázi. Koherentní metody mohou být velmi přesné, nejsou ale příliš robustní. Proto se většinou používají nekoherentní metody (tj. metody používající pouze amplitudu nebo fázi).

Z přesných pozic identických bodů se pak spočítá transformační funkce, která transformuje slave na master. Obvykle stačí k tomuto účelu afinní transformace, ačkoli některé zdroje doporučují použití polynomické transformace vyššího řádu. Pomocí takto získané transformační funkce je pak slave snímek převzorkován na rozměr master snímku.

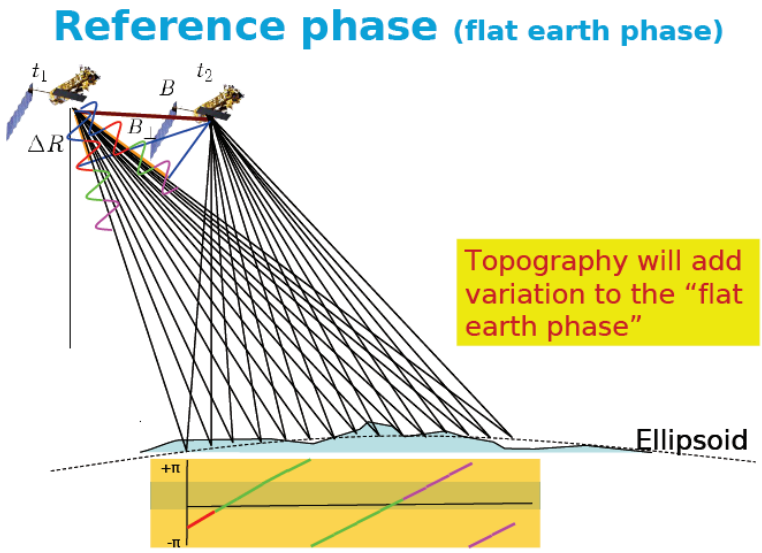
4.2 Sestavení interferogramu

Komplexní interferogram vznikne postupným komplexně sdruženým násobením odpovídajících si pixelů v obou snímcích. Pro každý pixel interferogramu je tak výsledná hodnota dána rovnicí (2). Přestože hlavním výsledkem je interferometrická fáze ϕ_p, ukládají se obvykle celá komplexní data (tj. fáze i amplituda interferogramu) pro případné pozdější výpočty. Výsledek se proto někdy nazývá *komplexní interferogram*.

4.3 Odstranění referenční fáze

Referenční fáze odpovídá zvolenému referenčnímu tělesu. Jako referenční těleso se obvykle používá elipsoid (např. WGS84 nebo Besselův). Určení referenční fáze probíhá ve čtyřech krocích (viz obr. 4):

1. Pro několik pozic na první dráze satelitu jsou určeny vzdálenosti k několika rovnoměrně rozmístěným bodům v interferogramu (tzv. referenčním bodům)



Obrázek 4: Odstranění referenční fáze (převzato z [3])

2. Pro zvolené referenční body z kroku 1 spočítáme pozici satelitu na druhé dráze (tj, pozici z které byly referenční body zaznamenány) a odpovídající vzdálenosti

3. Pro referenční body spočítáme rozdíly vzdáleností a jim odpovídající fázové rozdíly

4. Interpolací určíme referenční fázové rozdíly pro všechny body interferogramu

Referenční fázi se pak odečte od každého bodu interferogramu.

4.4 Rozbalení fáze

Problémem radarové interferometrie je, že interferometrická fáze je 2π-modulus absolutní hodnoty fáze. Neznáme ale absolutní fázi (počet celých 2π period) signálu. Získání absolutní fáze ze známé relativní fáze se nazývá *rozbalení fáze* (phase unwrapping). Je to teoreticky i početně náročný problém, a přestože dnes existuje několik víceméně standardních řešení (jako *např. metoda minimálního rozpětí stromu, metoda nejmenších čtverců*), žádné z nich nefunguje zcela spolehlivě. Příčinou je proměnný šum ve fázi a geometrické chyby dat jako *zkrácení, stín* atd.

Posouzení spolehlivosti rozbalení fáze je klíčovou součástí zhodnocení výsledků interferometrická zpracování. Pokud nejsou k mimo radarových dat k

dispozici další data, je takové rozhodnutí vždy založené na předpokladech o chování zkoumané oblasti.

4.5 Georeferencování

Georeferencování spočívá v převodu "radarových" souřadnic (vzdálenost, azimut a výška) do vhodného geodetického referenčního systému jako WGS84 (tedy na souřadnice Φ, Λ, H). Obvykle se postupuje přes geocentrický kartézský souřadnicový systém ze kterého se šířka délka pak odvodí Helmertovou transformací. Výsledkem transformace je pak seznam trojic bodů (Φ, Λ, H). Nenulová výška má za následek horizontální posun o velikosti zhruba $H/tan\,(\theta_{inc})$, kde θ_{inc} je úhel dopadu. V důsledku toho nejsou body pravidelně rozloženy a je tedy třeba provést interpolaci, aby vznikla pravidelná mřížka na referenčním tělese. Často se používá Delaunyho triangulace a následná lineární interpolace.

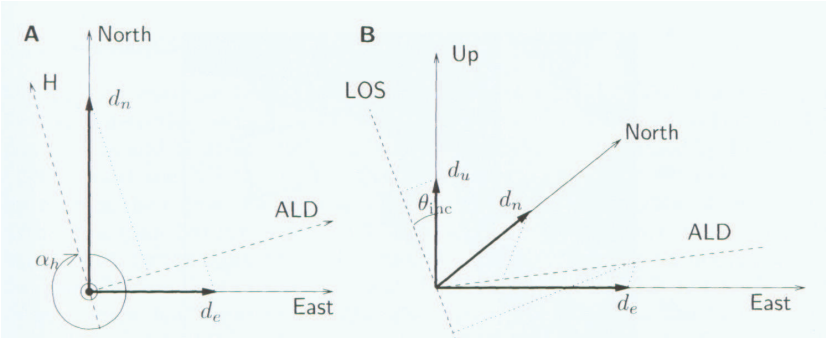
5 InSAR pro určování deformací

Vzhledem k tomu, že družici není vždy možné nebo vhodné navést na stejnou dráhu, podílí se na interferometrické fázi tvar terénu i deformace, ke kterým došlo v době mezi časy pořízení snímků. Pokud nás zajímají pouze deformace, je třeba vliv terénu nějak vyloučit. Jednou z možností je tzv. diferenční interferometrie, Při ní se s pomocí nadbytečných měření nebo doplňujících informací konstruuje tzv. diferenční interferogram - interferogram "opravený" o vliv tvaru terénu. Ten se zpracovává postupem uvedeným v kapitole 4, konkrétně přepočtem fáze na výšku a georeferencováním.

Diferenční interferogram lze získat několika způsoby: tzv. *two-pass* metoda využívá známého modelu terénu. Tento model terénu se přepočítá na prostorovou základnu interferometrického páru a odečte z interferogramu, čímž se odstraní vliv tvaru terénu. Další možností je využít více SAR snímků. Tyto snímky se vyberou tak, aby bylo možno sestavit dvě dvojice snímků. Jednu takovou, aby snímky dělilo pouze krátké časové období o kterém se dá předpokládat, že bylo bez deformací. Zároveň tyto snímky musí mít vhodnou prostorovou základnu pro určení tvaru terénu. Tato dvojice se nazývá *topografická dvojice* (*topographic pair*).

Druhá, *deformační,* dvojice je tvořena snímky z období před a po předpokládaném deformačním procesu. Z obou dvojic se vytvoří interferogramy až po rozbalení fáze (viz kap. 4). Topografický interferogram se pak odečte od deformačního, čímž vyloučíme tvar terénu a získáme diferenční interferogram postihující pouze deformace (zanedbáme-li chyby vlivu atmosféry, chyby z nepřesnosti orbit atd.).

Potřebné dvojice snímků lze získat ze tří snímků nebo ze čtyř snímků. V prvním případě je jeden snímek společný oběma dvojicím. Tento časově nejstarší snímek je použit jako master snímek při tvorbě obou interferogramů. Tato metoda se nazývá *three-pass* metoda.



Obrázek 5: Rozklad LOS posunů na prostorové složky (převzato z [1]). A ukazuje složky ve směrech sever a východ při pohledu shora. B ukazuje třírozměrný případ včetně vertikální složky.

V případě čtyř snímků, tzv. *four-pass* metody, jsou oba interferogramy nezávislé, tj. nemají žádný společný snímek. Ještě před odečtením je tedy třeba interferogramy koregistrovat.

Po rozbalení fáze a odstranění topografie v interferogramu zůstane pouze vliv posunů. Zvolí se referenční bod a postupným nasčítáním rozdílů fáze se vypočtou posuny pro celý snímek (nebo pro tu část s uspokojivou mírou koherence - viz kap. 3.1). Je třeba si uvědomit, že jde o posuny ve směru pohledu radaru (*LOS - line of sight posuny*). Rozložení těchto LOS posunů d_r do tří prostorových složek d_n, d_e, d_u (sever, východ a vzhůru) je obecně velmi složité. Pro rozklad platí vztah:

$$d_r = d_u cos\left(\theta_{inc}\right) - sin\left(\theta_{inc}\right)\left[d_n cos\left(\alpha_h - 3\frac{\pi}{2}\right) + d_e sin\left(\alpha_h - 3\frac{\pi}{2}\right)\right] \quad (5)$$

kde $\left(\alpha_h - 3\frac{\pi}{2}\right)$ je úhel ke směru pohledu radaru (který je kolmý ke směru pohybu radaru) a θ_{inc} je úhel dopadu (viz obr. 5).

Pomocí dvou interferogramů, jednoho ze vzestupné dráhy satelitu a jednoho ze sestupné dráhy, je možné získat dvě ze tří složek. Všechny tři složky je možné získat pouze s využitím dalších dat nebo přijetím nějakého předpokladu. Například při vyhodnocování pohybu ledovců se předpokládá pohyb pouze paralelně k povrchu (tj. ve směru gradientu modelu terénu) [([1]].

6 Praktický návod pro tvorbu interferogramu

Pro zpracování SAR snímků existuje několik nástrojů. Tato kapitola popisuje práci s programem NEST (Next ESA SAR Toolbox) a SNAPHU. Většina úkonů se provádí v programu NEST, SNAPHU slouží pro rozbalení fáze.

NEST

NEST je open source program pro zpracování SAR snímků vyvíjený kanadskou firmou Array Systems Computing Inc. Program je dostupný zdarma (pouze na základě registrace) a je multiplatformní. Kromě zdrojových kódů jsou k dispozici i sestavení pro MS Windows (32b i 64b), Linux (32b i 64b) a Mac OS X (Snow Leopard 10.6.8).

Co se týče interferometrického zpracování lze v NESTu provádět všechny operace kromě rozbalení fáze.

SNAPHU

SNAPHU je software vyvinutý na Stanfordské univerzitě speciálně pro účely rozbalení fáze. Program je řešený jako utilita příkazové řádky a je dostupný pouze ve formě zdrojových kódů. Kompilace je ale jednoduchá, stačí postupovat podle instrukcí v dokumentu README (`http://www-star.stanford.edu/sar_group/snaphu/README`). Použití v prostředí MS Windows komplikuje fakt, že je program určený primárně pro Unix/Linux. Bez problému ho lze ale zkompilovat v prostředí cygwin (`http://www.cygwin.com/`).

6.1 Základní koncepty

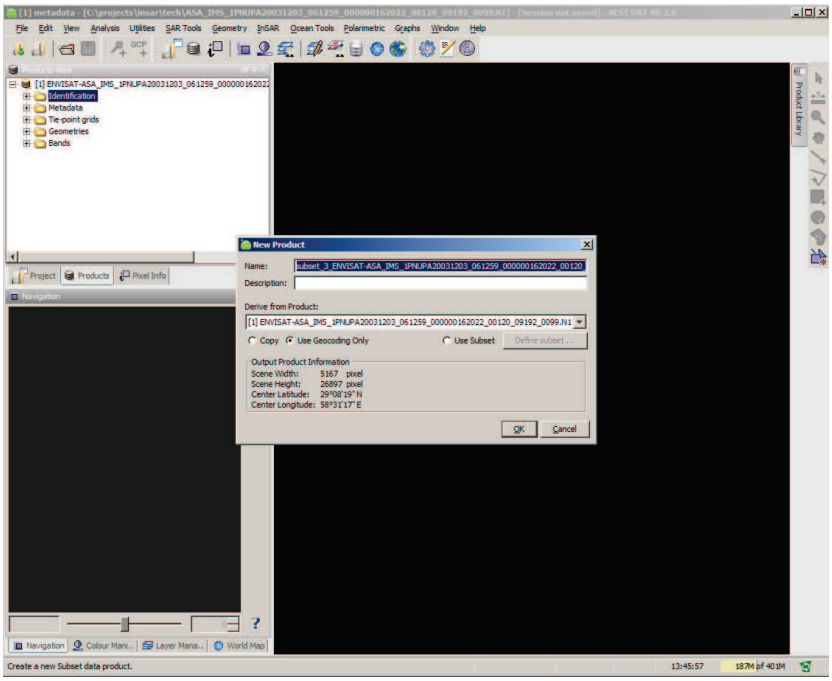
Práce s programem NEST se příliš neliší od práce s jinými programy s grafickým rozhraním. Jednotlivé funkce se spouštějí výběrem v menu členěném podle typu požadované operace (Soubor, SAR Nástroje, InSAR, atd.). Důležitým konceptem jsou *projekt*, *produkt* a *čtečka produktů*.

Projekt je abstraktní struktura, která slouží k organizaci a správě otevřených dat, výsledků výpočtů atd. Poskytuje rámec pro práci s více datovými zdroji a především s výsledky různých operací nad daty.

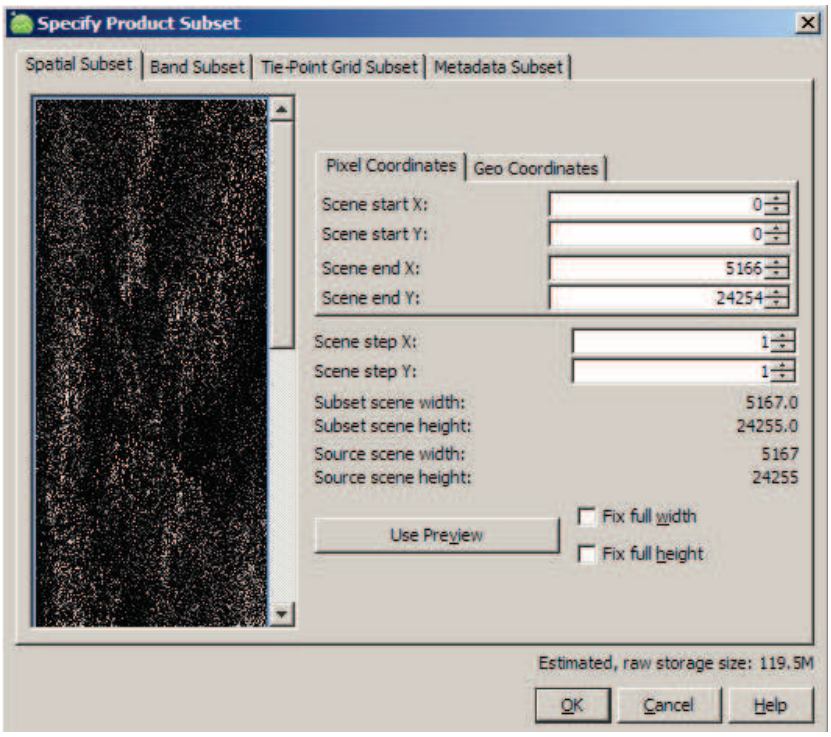
V kontextu NEST je *produkt* SAR snímek (stejně označuje poskytovaná nejen radarová data Evropská kosmická agentura). Čtečka produktů není nic jiného než modul, který umí načíst produkt daného typu. Analogicky Zapisovatel produktu umí data v příslušném formátu ukládat. Proto se data v programu NEST otevírají místo obvyklého *Open File* výběrem příslušné čtečky v menu *File→Product Readers→[jméno čtečky]*. Např. snímek ze satelitu Envisat by se tedy otevřel pomocí funkce *File→Product Readers→Open ENVISAT ASAR Product*.

6.2 Práce s produkty

Seznam otevřených snímků je v levé části okna v panelu *Products*. Při kliknutí pravým tlačítkem na produkt se otevře kontextová nabídka s nejpoužívanějšími funkcemi. Na stejném místě se nachází panel *Project*, který obsahuje seznam produktů a jejich derivátů ve formě stromové struktury. Pravé tlačítko myši opět otevírá kontextovou nabídku. Všechny funkce z kontextových nabídek jsou přístupné i klasicky z menu aplikace.



Obrázek 6: dialog tvorby výřezu



Obrázek 7: dialog definice výřezu

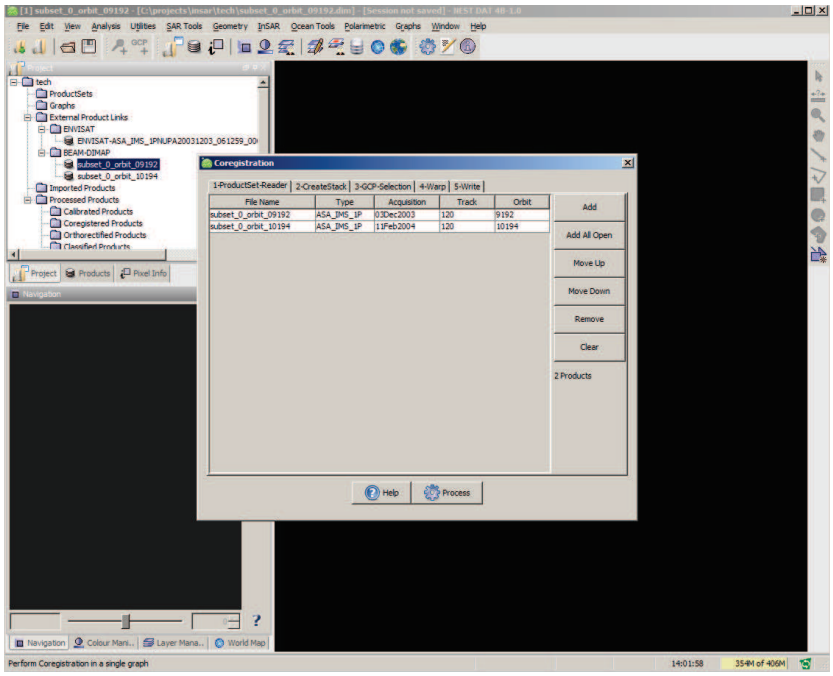
Důležitou vlastností NESTu je možnost vytvářet *výřezy* (*subsets*) produktů. Protože jsou SAR snímky obecně značně velké (v řádu stovek MB) je zpracování, ale třeba i jen zobrazení, operací poměrně náročnou na výkon počítače. Je proto výhodné z produktů vybrat pouze oblast, která je skutečně zajímavá z hlediska dané aplikace.

Výřez se vytvoří pomocí nástroje *File→Create Subset*. V dialogovém okně nástroje (viz obr. 6) je třeba vybrat zdrojový produkt, zaškrtnout volbu *Use subset* a pomocí tlačítka *Define subset* nadefinovat požadovaný výřez. Výřez lze definovat graficky (tažením myši přes náhled snímku) nebo pomocí pixelových či geografických souřadnic (viz obr. 7).

6.3 Koregistrace a převzorkování

Koregistraci dvou produktů lze provést nástrojem *SAR Tools -> Automatic Coregistration*. V okně které se otevře (viz obrázek 8) nejprve přidáme produkty, které chceme koregistrovat (lze použít tlačítko *Add All Open* pro přidání všech právě otevřených produktů.

Poté je třeba na panelu *CreateStack* vytvořit *stack* - nadefinovat master snímek a slave snímek a jaké pásmo použít pro koregistraci. Na výběr je *i, q* (tedy



Obrázek 8: dialog koregistrace

přímo měřená data - viz kap. 2) a amplituda a fáze. Zde se vyberou pásma *i*, *q*.vybrat typ převzorkování a zvolit meze výstupu (typicky ponecháme hodnotu master). Dále je možné zvolit metodu převzorkování. Pro účely interferometrie by se převzorkování nemělo provádět - je třeba nastavit tedy hodnotu NONE.

Na dalším panelu lze upravit způsob volby kontrolních bodů pro koregistraci - jejich počet, velikost okna pro hrubou a přesnou koregistraci a několik dalších faktorů. Ve většině případů lze tyto hodnoty ponechat na přednastavených hodnotách. Pokud je třeba parametry upravovat, je možno v nápovědě najít přesný postup koregistrace, který NEST používá, a přesný význam parametrů.

Na panelu č. 4 - Warp - je možné změnit typ interpolace při převzorkování a konečně na posledním panelu se vyplňuje kam uložit výsledný koregistrovaný produkt. Tento produkt je v NEST nazýván *koregistrovaný stack* (*coregistered stack*).

6.4 Sestavení interferogramu a odstranění "ploché země"

K tomuto účelu slouží nástroj *InSAR -> Products -> Interferogram Formation*. Je třeba vybrat zdroj dat, což musí být koregistrovaný stack (tj. výsledek koregistrace z předchozího kroku), a zadat umístění a jméno výsledného interferogramu. Je také možné upravit parametry ovlivňující výpočet fáze ploché země (řád polynomu aproximační funkce a počet bodů pro interpolaci).

6.5 Tvorba koherenční mapy

Koherenční mapu lze vytvořit jednoduše, pomocí nástroje *InSAR→Products→Coherence Estimation.*

6.6 Rozbalení fáze

NEST sám o sobě bohužel rozbalení fáze neumí, i když podle informací z diskuzního fóra je do budoucna počítáno s integrací SNAPHU přímo do NEST. Prozatím je potřeba data (tj. interferogram) z NEST vyexportovat, pomocí nástroje SNAPHU rozbalit fázi a data znovu importovat.

Pro rozbalení fáze ve SNAPHU je potřeba mít matici vah. Pro její odhad lze použít amplitudu snímků, ze kterých byl interferogram vytvořen, ale lepší je použít koherenci. Koherenční obraz lze vytvořit v NESTu (viz 6.5).

Interferogram a koherenční obraz se vyexportují v obecném binárním formátu pomocí funkce *File→Product Writers→Export generic binary.* Tyto soubory poslouží jako vstupní data pro SNAPHU. Dále se v metadatech interferogramu najde délka řádku - údaj *num_samples_per_line* v abstrahovaných metadatech.

SNAPHU má mnoho konfiguračních parametrů. Jejich plný popis lze najít v dokumentaci ke SNAPHU ([4]). Typické použití pro účely rozbalení fáze diferenčního interferogramu je následující:

```
snaphu -d wrappedfile line_len -c corrfile
```

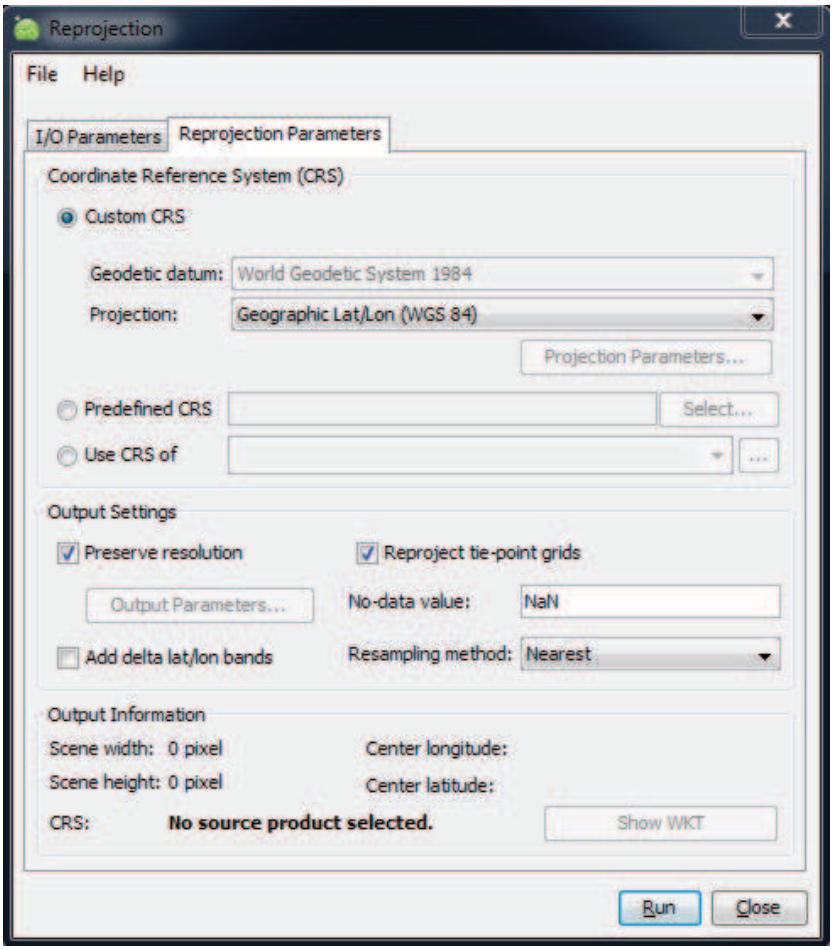
V tomto příkazu:

- parametr *-d* říká, že jde o interferogram znázorňující deformace
- *wrappedfile* je vstupní interferogram
- parametr *-c corrfile* je soubor koherence
- *line_len* je délka řádku ve vstupních datech (interferogram i koherenční obraz mají stejný rozměr)

Výsledkem programu je "rozbalený" interferogram. Ten se importuje zpět do NESTu jako obecný binární formát (*File→Product Readers→Common File Formats→Open Generic Binary*).

6.7 Georeferencování

Interferogram lze georeferencovat pomocí funkce *Geometry→Reprojection* (viz obr. *9*). NEST podporuje georeferencování do několika referenčních systémů, kromě obligátního WGS84 i do Křovákova zobrazení.



Obrázek 9: Dialog georeferencování

Reference

[1] R. F. Hanssen: Radar Interferometry - Data Interpretation and error analysis, Kluwer Academic Publishers 2001

[2] V. B. H. (Gini) Ketelaar - Satellite Radar Interferometry, Subsidence Monitoring Techniques, Springer 2009

[3] P. Marinkovic, R. Hanssen - InSAR Principles - basic tutorial (`http://nest.s3.amazonaws.com/docs/insar_training.pdf`))

[4] dokumentace programu SNAPHU: `http://www-star.stanford.edu/sar_group/snaphu/snaphu_man1.html`

[5] NEST User Guide (`http://nest.s3.amazonaws.com/docs/nest_user_manual-4B.pdf`)