

Radarová interferometrie: chyby v georeferencování

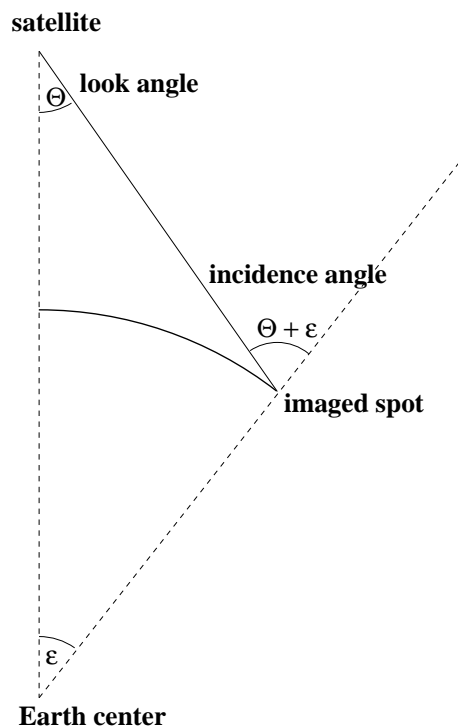
Ivana Čapková
Katedra mapování a kartografie
České vysoké učení technické v Praze

prosinec 2005

1 Úvod do radarové interferometrie

Radarová interferometrie je metoda zpracovávající dva a více radarových družicových snímků, sloužící buď k vytvoření digitálního modelu terénu, nebo sledování deformací zemské kůry (poklesy, sesuvy, postseismické deformace a podobně). Vlnová délka radaru je v řádu několika centimetrů a koherentní radar (používá se radar se syntetickou aperturou, dále jen SAR) je schopen měřit kromě intenzity přijatého signálu i jeho fázi, právě v rámci těchto několika centimetrů. Z výsledku lze při dobré konfiguraci podmínek (která není zaručena) a za předpokladu dostatečného množství dat usuzovat na deformace v řádu několika milimetrů.

Radarový paprsek však - na rozdíl od paprsku optického při obrazovém dálkovém průzkumu Země - nedopadá na Zemi kolmo k jejímu povrchu, ale pod incidenčním úhlem, který činí uprostřed scény cca 21° . Geometrie snímání je zobrazena na obrázku 1.



Obrázek 1: Geometrie radarového snímání

Základní pojmy

Rozlišujeme směr *azimutu* a *range*: azimut je směr rovnoběžný s vektorem rychlosti družice, range je směr kolmý.

Dále rozlišujeme *slant range* a *ground range*, tedy vzdálenost měřenou mezi družicí a jednotlivými body na zemském povrchu (resp. její rozdíl pro různé body na scéně) a vzdálenost měřenou mezi jednotlivými body přímo po zemském povrchu. Jelikož pozice daného pixelu závisí na slant range a rozlišení je ve slant range rovnoměrné, rozlišení v ground range se nutně mění v souvislosti se změnou úhlu pohledu (a incidenčního úhlu) v rámci scény. Rozlišení ve směru azimutu je konstantní a mnohem lepší než rozlišení v range.

Vzhledem k tomu, že se družice a Země (tedy vysílač a odražeč) vůči sobě vzájemně pohybují, dochází k dopplerovskému posunu mezi vyslaným a přijatým signálem. Tento posun je nulový ve směru kolmém na směr letu družice, nicméně toto není vždy přesně střed paprsku, tj. směr, ve kterém se měří range (rozdíl není nicméně podstatný). Tato mírná "nekolmost" je dána nedokonalou konstrukcí družice a zemskou rotací. Jako parametr dat se proto udává tzv. *Doppler centroid*, frekvenční posun odpovídající středu paprsku, který je přímo úměrný úhlu natočení středu paprsku od směru kolmého ke směru letu družice.

2 Georeferencování obecně

Zkoušeli jsme georeferencovat data na základě amplitudy (původní obraz, tzn. s nerovnoměrným rozlišením) a identických bodů (vzhledem ke snímku z LandSatu). Analyticky bylo odvozeno [4], že k dosažení chyby menší, než činí rozlišení, je třeba polynom minimálně druhého stupně, v tomto případě však došlo ke zkroucení scény a i transformační rezidua byla velmi vysoká. Částečně je to dáno deformací radarového obrazu vlivem různé výšky terénu, částečně je to dáno jinými odrazivými vlastnostmi různých terénních objektů (v radarových snímcích se velmi těžko vyhledávají identické body mimo vodní plochy) a malého pokrytí snímku z LandSatu.

Druhou možností je přímé georeferencování, které však softwarové prostředky pro klasický dálkový průzkum Země typicky neumožňují.

Je několik základních metod přímého georeferencování, software DORIS využívá georeferencování na základě známé výšky (ta je získána rozbalením interferogramu a vynásobením výškovou konstantou, která je dána konfigurací družic) a jednoho snímku. Článek [2] uvádí metodu pro řešení problému georeferencování na základě bodů, které jsou identifikovány v obou snímcích (stereo SAR).

My se zde však budeme zabývat metodou georeferencování na základě jednoho snímku a známé výšky nad elipsoidem (máme k dispozici externí DEM. Je zde nutno splnit tři podmínky, ústící v soustavu tří rovnic:

- vzdálenost družice a odražeče odpovídá umístění daného odražeče v obrazu, tedy slant range:

$$(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2 = r^2, \quad (1)$$

kde x, y, z značí souřadnice odražeče, x_s, y_s, z_s souřadnice družice (obojí v pravoúhlém souřadném systému, např. WGS-84) a r je slant-range daného odražeče,

- bod leží na zemském povrchu (elipsoidu), resp. ve výšce h nad ním

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

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

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

$$f_D = \frac{2 (\vec{V}_s - \vec{V}_t) \cdot (\vec{R}_s - \vec{R}_t)}{\lambda |\vec{R}_s - \vec{R}_t|}, \quad (3)$$

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 v pravo či vlevo od dráhy letu družice. To je dáno konstrukčně.

3 Charakteristika chyb v datech

Data z družic obsahují různé nepřesnosti, které znesnadňují nejen georeferencování, ale i interpretaci interferogramu. Jsou to

- nepřesnosti v poloze družic, které mají tři složky:
 - *radiální*, tj. ve směru kolmém na zemský povrch – tato chyba je v řádu 6 cm (RMS),
 - *across-track*, tj. ve směru kolmém na rovinu oběhu družice – tato chyba je v řádu 15 cm (RMS),
 - *along-track*, tj. ve směru letu družice (neudává se, je však největší),
- a chyby časování přijatého signálu, tedy:
 - doby vyslání prvního signálu, jehož odezva zformuje první řádku dat (dále jen *azimut-time t*), oprava dt se pohybuje v řádu milisekund,
 - doby přijetí první odezvy po vyslání signálu, tedy doba mezi vysláním signálu a přijetím signálu náležejícímu prvnímu pixelu v dané lince (dále jen *range-time τ*), oprava $d\tau$ se pohybuje v řádu mikrosekund. Z této doby se následně počítá úhel pohledu Θ , který vstupuje téměř do všech dalších výpočtů.

Chyby časování se neuvádějí, nicméně dle našich výsledků způsobují nejvíce chyb. Jejich oprava je na rozdíl od opravy polohy družice snadná.

Zde je ještě vhodné dodat, že *along-track* složka chyby polohy družic odpovídá chybě *azimut-time*, tj. pokud upravíme časování, není třeba se zabývat *along-track* chybou polohy družic.

4 Projevy chyb v datech

Chyby v datech mají v zásadě trojí dopad:

- posun mezi zpracovávanými snímky je spočten špatně – to je způsobeno pouze relativními chybami v časování (tj. pokud mají oba zpracovávané snímky stejné chyby v časování, bude posun spočten správně); špatně spočtený posun v *range* odpovídá chybě v *range-time*, špatně spočtený posun ve směru azimutu odpovídá chybě v *azimut-time*,
- deformace georeferencovaného snímku vůči skutečnosti, tedy
 - posun – zde mají vliv všechny jmenované chyby, jelikož však rozlišení snímku je řádově větší než nepřesnosti v poloze družic, budeme brát v úvahu pouze chyby časování,
 - natočení – zde má vliv nepřesnost Doppler centroidu,

- změna měřítka – zde má vliv nepřesnost oscilátorů, udávajících vzorkovací frekvenci a frekvenci pulzů (PRF);

tato deformace (hlavní vliv má posun, změna měřítka ani pootočení nejsou pouhým okem viditelné a nebudeme se jimi zabývat) se projeví též špatným převodem externího DEM do radarových souřadnic.

- ve snímku vzniknou tzv. *reziduální fringe*, které jsou způsobeny nepřesným odečtením tzv. *flat-Earth* fáze, tedy fáze odpovídající zemskému povrchu bez topografie; zde mají vliv across-track a radiální složka chyby orbit (podrobně to bylo vyhodnoceno v [4]) a chyba v range-time $d\tau$ (tedy chyba v úhlu pohledu $d\Theta$),

4.1 Výpočet posunu mezi snímky

Výpočet posunu mezi snímky ze známých poloh družic se používá na počátku interferometrického zpracování v software DORIS pouze pro odhad tohoto posunu – přesný posun, který není konstantní pro všechny body obrazu, se později vyhodnocuje na základě amplitudových vlastností obrazu. Tyto metody však pro správné fungování potřebují znát přibližnou hodnotu posunu.

Azimut

Vzhledem k tomu, že nepřesnosti drah družic jsou v řádu centimetrů a rozlišení snímku není lepší než několik metrů, budeme ve výpočtu posunu snímků vůči sobě nepřesnosti orbit zanedbávat a budeme uvažovat pouze nepřesnosti v časování.

Definujme základnu jako spojnicu poloh obou družic v takových časech, aby byla vždy kolmá na směr rychlosti master družice [3]. (V ideálním případě je dráha slave družice rovnoběžná s dráhou master družice.) Základna tedy leží v rovině kolmé na vektor rychlosti master družice a v této rovině leží též odrazeč na zemském povrchu.

Na základě této definice lze přiřadit každé řádce v jednom snímku řádce ve snímku druhém. Potom lze spočítat posun mezi oběma snímky ve směru azimutu jako [3]

$$p_a = \text{PRF}(t_2 - t_{2start}), \quad (4)$$

kde t_2 je čas, ve kterém proběhla akvizice řádky odpovídající první řádce ve snímku, a t_{2start} je čas akvizice první řádky druhého snímku. PRF (*Pulse Resolution Frequency*) je frekvence vysílaných pulzů.

Range

Posun snímků ve směru range je odlišný. Dle [3] spočteme nejprve pozici odrazeče ze známých souřadnic středu scény \vec{T} , potom "slant-range vektor"

$$\vec{r}_i = \vec{T} - \vec{S}_i, \quad (5)$$

kde S_i jsou souřadnice družice, a následně posun ve směru range

$$p_r = \frac{|r_2| - |r_1|}{r_r}, \quad (6)$$

kde r_r je rozlišení ve slant range.

4.2 Vliv na posun georeferencované scény

Radarkódování, tedy převod geodetických souřadnic (ve kterých je georeferencován externí digitální model terénu), je postup inverzní ke georeferencování. Vyhodnocením posunu mezi interferogramem a syntetickým interferogramem, vygenerovaným z digitálního modelu terénu lze přímo získat opravy časování v obou směrech, a to pomocí níže uvedených vztahů.

4.2.1 Azimut

Opravu časování v azimutu spočteme přibližně s pomocí rychlosti družice a rozlišení

$$\Delta t = \frac{\Delta a}{v_{gr}} \Delta p_a = 0.6767 \Delta p_a [ms], \quad (7)$$

kde Δp_a je posun mezi interferogramem a syntetickým interferogramem, vygenerovaným z DEM, ve směru azimutu, $\Delta a \approx 4.5$ m je rozlišení ve směru azimutu a $v_{gr} = 6650$ m/s [1] je rychlost stopy, kterou tvoří radarový paprsek na zemském povrchu.

4.2.2 Range

Nazveme-li Δp_r posun mezi interferogramem a syntetickým interferogramem, vygenerovaným z DEM, ve směru range, lze opravu časování $\Delta \tau$ vyjádřit jako

$$\Delta \tau = \Delta p_r \cdot s_p, \quad (8)$$

kde s_p je časové rozlišení jednoho pixelu (ve slant range), tedy

$$s_p = \frac{1}{f} = 0.052736 \mu s, \quad (9)$$

kde $f = 18.962468$ MHz je vzorkovací frekvence ve směru range.

4.3 Vliv na reziduální fringe

Jak již bylo řečeno, reziduální fringe, tedy fringe interpretovatelné jako "náklon" scény, jsou především způsobeny nepřesně odečtenou flat-Earth fází, vypočtenou z nepřesné polohy družice a nepřesného časování. Tato flat-Earth fáze je dána vztahem

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\Theta - \alpha) = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel}, \quad (10)$$

kde λ je vlnová délka radarového signálu, B je délka základny (tj. vzdálenost satelitů v době akvizice), α je orientace této základny, Θ je úhel pohledu a B_{\parallel} je složka základny rovnoběžná s paprskem. Diplomová práce [4] se podrobně zabývá vlivem chyb v orbitách na tyto reziduální fringe a vyplývá z ní, že RMS chybám orbit při daných parametrech snímků odpovídá zhruba 0.8 fringe na celou scénu. Diplomová práce však nebere vůbec ohled na chyby v časování snímků.

Kromě nepřesnosti polohy družice je odečítaná flat-Earth fáze ovlivněna také nepřesnostmi v časování snímků (pouze range-time), a to nejen relativní chybou (tedy rozdílnou chybou v časování master a slave snímku), ale i chybou absolutní. Nepřesnost v range časování $d\tau$ se ve výpočtech přenáší na chybu v úhlu pohledu $d\Theta$.

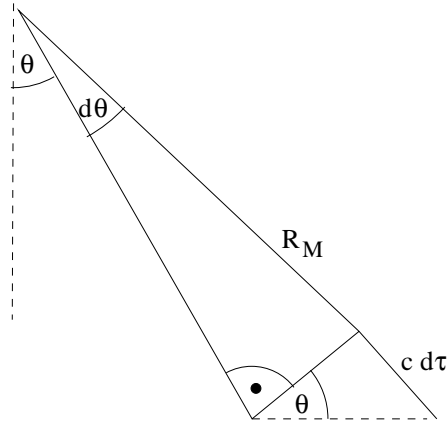
Vliv chyby range-time na chybu v úhlu pohledu

Odvození vlivu chyby v range-time na chybu v úhlu pohledu vychází z obrázku 2.

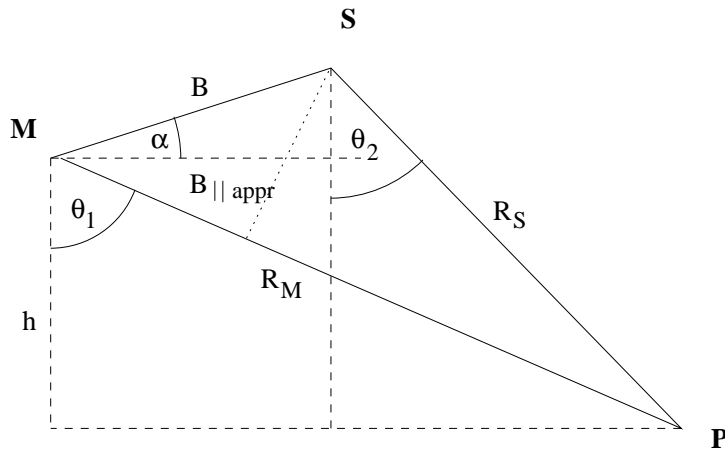
Pak lze snadno odvodit, že

$$d\Theta = \frac{c}{R_M \tan \Theta} d\tau. \quad (11)$$

Odvození vlivu chyby v časování je složitější a zahrnuje výpočet rovnoběžné složky základny na základě znalosti úhlu pohledu obou družic. Situace je znázorněna v obrázku 3.



Obrázek 2: Vliv chyby v range-time na chybu ve vypočteném úhlu pohledu.



Obrázek 3: Geometrie snímání při různých úhlech pohledu

Nepřesnost rovnoběžné složky základny

Rovnoběžná (myšleno ve směru paprsku) složka základny je definována jako rozdíl $R_M - R_S$ a typicky se udává tzv. *far-field* aproximace, kde se oba úhly pohledy považují za identické, tedy

$$B_{\parallel ap} = B \sin(\Theta - \alpha). \quad (12)$$

V našem případě však tyto úhly za identické považovat nemůžeme a musíme vztah zpřesnit.

Reziduální fáze, která zbude v interferogramu po odečtení (nepřesné) flat-Earth fáze pak bude (vycházíme ze vztahu (10))

$$d\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} dB_{\parallel}. \quad (13)$$

Chybu v rovnoběžné složce základny odvodíme z obrázku 3:

$$h = R_M \cos \Theta_1, \quad (14)$$

$$h + B \sin \alpha = R_S \cos \Theta_2, \quad (15)$$

$$(16)$$

tedy

$$B_{\parallel} = R_M - R_S = \frac{h}{\cos \Theta_1} - \frac{h + B \sin \alpha}{\cos \Theta_2}. \quad (17)$$

Zavedeme-li chyby v úhlech pohledu jednotlivých snímků $d\Theta_1$ a $d\Theta_2$ a chybu z far-field aproximace $\Delta\Theta$ tak, že platí (viz obrázek 3)

$$\Theta_1 = \Theta_0 + d\Theta_1, \quad (18)$$

$$\Theta_2 = \Theta_0 + \Delta\Theta + d\Theta_2, \quad (19)$$

a pro usnadnění zápisu zavedeme $\Theta_a = \Theta_0 + d\Theta_1 + d\Theta_2 + \Delta\Theta \approx \Theta_0$, můžeme psát (používáme aproximaci $d\Theta \approx -\frac{B \cos(\Theta_0 - \alpha)}{R_M}$)

$$B_{\parallel} = B \sin(\Theta_0 - \alpha) \cdot \frac{\cos \Theta_0}{\cos \Theta_a} - \frac{B \sin \alpha \tan \Theta_0}{\cos \Theta_a} d\Theta_1 - \frac{h \tan \Theta_0}{\cos \Theta_a} (d\Theta_1 - d\Theta_2), \quad (20)$$

a to se zanedbáním členů druhého a vyšších řádů.

Tento vztah lze na základě předpokladů $\cos d\Theta \approx 1$, $\sin d\Theta \approx d\Theta$ a $\tan \Theta_0 d\Theta \ll 1$ ($d\Theta = d\Theta_1 + \Delta\Theta + d\Theta_2$) zjednodušit na

$$B_{\parallel} = B \sin(\Theta_0 - \alpha) \cdot (1 + \nu_{d\Theta_a} + \nu_{d\Theta_1} d\Theta_1 + \nu_{d\Theta_1 - d\Theta_2} (d\Theta_1 - d\Theta_2)), \quad (21)$$

kde

$$\nu_{d\Theta_a} = \frac{\cos \Theta_0}{\cos \Theta_a} - 1, \quad (22)$$

$$\nu_{d\Theta_1} = -\frac{\tan \Theta_0 \sin \alpha}{\cos \Theta_0 \sin(\Theta_0 - \alpha)}, \quad (23)$$

$$\nu_{d\Theta_1 - d\Theta_2} = -\frac{h \tan \Theta_0}{B \cos \Theta_a \sin(\Theta_0 - \alpha)}. \quad (24)$$

Zde je nutno dodat, že všechny koeficienty (nelineárně) závisí na úhlu pohledu Θ_0 , takže nejenže budou v interferogramu vznikat reziduální fringe, ale budou též reprezentovat nelineární fázi (tj. jejich frekvence nebude konstantní). Závislost fáze na úhlu pohledu je stejná jako jako závislost rovnoběžné složky základny na úhlu pohledu, protože vztah (10) je lineární.

5 Vliv chyby ve výšce na georeferencování

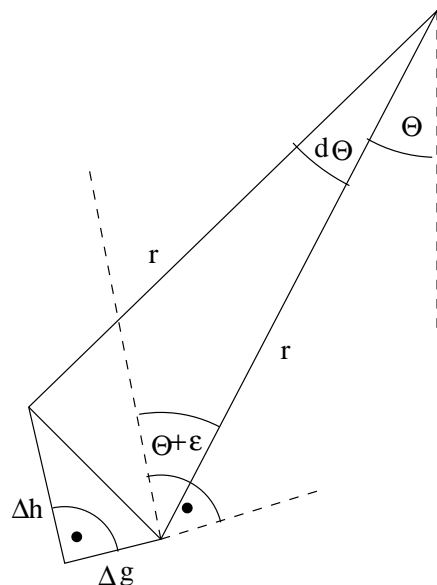
Aby bylo georeferencování na základě jednoho snímku jednoznačné, je třeba znát výšku daného bodu nad referenční plochou. Chyba v georeferencování vlivem chyby ve výšce vzniká pouze ve směru range a její velikost lze odvodit dle obrázku 4:

$$\Delta g = \frac{\Delta h}{\tan(\Theta + \varepsilon)}, \quad (25)$$

kde $\Theta + \varepsilon$ je incidenční úhel. Pro střed scény, kde $\Theta + \varepsilon \approx 23^\circ$, tedy $\Delta g \approx 2.4\Delta h$.

6 Vyhodnocení vlivu

Při zpracování jsme použili dva páry dat, jeden s časovou základnou 1 den (tzv. topo pár, nepředpokládáme deformace), a druhý s časovou základnou 70 dní (tzv. defo pár). Podrobná konfigurace těchto párů je uvedena v [4], zde uvádíme jen výběr parametrů (tabulka 1). Oba páry mají společný master snímek.



Obrázek 4: Odvození chyby georeferencování v závislosti na chybě výšky

	topo pár	defo pár
délka základny B [m]	120.4	98.7
orientace základny α [°]	-5.3	13.2
kolmá složka základny B_{\perp} [m]	110	98.3
rovnoběžná složka základny B_{\parallel} [m]	49	9.3
úhel pohledu Θ_0 [°]	18.6	18.6

Tabulka 1: Parametry základny pro dostupná data. Všechny hodnoty jsou vztaheny ke středu scény, na jiných místech může být hodnota mírně odlišná.

6.1 Chyba vypočteného posunu mezi snímky

Tabulka 2 byla převzata z [4] a udává hodnoty správného a vypočteného posunu mezi oběma snímky. Z tabulky je vidět, že posun ve směru range byl spočten víceméně správně (relativní chyba v range-time je tedy minimální).

výpočet z	poloh družic		amplitudy		rozdíl	
	azimut	range	azimut	range	azimut	range
topo pár	-39	-7	-251	-7	-212	0
defo pár	27	-2	43	-1	16	1

Tabulka 2: Rozdíly posunu snímků spočtených z poloh družic a z amplitudové analýzy obrazů. Hodnoty jsou v pixelech a mohou se měnit o několik pixelů v závislosti na pozici ve snímku.

Na základě těchto hodnot jsme opravili časování obou slave snímků a výpočet posunu z polohy družic provedli ještě jednou. Vzhledem k tomu, že hodnotu posunu mezi snímky stačí znát pouze přibližně, nebyly opravy vyhodnoceny přesně.

6.2 Posun mezi interferogramem a radarkódovaným DEM

Posun mezi interferogramem a radarkódovaným DEM byl vyhodnocen ručně, přibližně na základě jednoho identického bodu, a je stejný pro oba zpracované páry dat. To je dáno tím, že geokódování

se provádí na základě pouze jednoho snímku a znalosti výšek. Posun ve směru azimutu je cca -875 pixelů, posun ve směru range je 81 pixelů.

Tyto hodnoty nám umožní opravit časování master snímku v obou směrech, společně s nimi je však nutné opravit (o stejné hodnoty) i časování obou slave snímků. Oprava činí v našem případě 512 ms v azimut-time (master snímek pochází z ERS-2) a $-4.5 \mu s$ v range-time.

6.3 Reziduální fringe

Nyní vyčíslíme koeficienty $\nu_{d\Theta_a}$, $\nu_{d\Theta_1}$ a $\nu_{d\Theta_1-d\Theta_2}$, objevující se ve vztahu (21). Zde dosazujeme $\Delta\Theta = \frac{B \cos(\Theta_0 - \alpha)}{R_M}$, kde $R_M = 835 km$. Za $d\Theta_1$ dosazujeme hodnoty odhadnuté z chyby posunu interferogramu vůči radarkódovanému DEM ($d\Theta_1 = 0.58^\circ$) a za $d\Theta_1 - d\Theta_2$ chybu odpovídající chybě časování, která by způsobila chybu ve výpočtu posunu o jeden pixel (posun ve směru range byl vypočten správně, viz tabulku 2), tedy $|d\tau_1 - d\tau_2| = 0.05 \mu s$ (viz vztah (9)) a $|d\Theta_1 - d\Theta_2| = 0.0031^\circ$. Koeficienty včetně příslušné změny rovnoběžné složky základny jsou uvedeny v tabulce 3.

	topo pár	defo pár
$\nu_{d\Theta_a}$	0.0071	0.0071
$\nu_{d\Theta_1}$	0.081	-0.878
$\nu_{d\Theta_1-d\Theta_2}$	-6244	-3.06e4
ΔB_a [m]	0.31	0.064
$\Delta B_{d\Theta_1}$ [m]	-0.036	0.081
$\Delta B_{d\Theta_1-d\Theta_2}$ [m]	15	15

Tabulka 3: Vyčíslený vliv chybného časování na délku rovnoběžné základny pro topo a defo pár.

Z hodnot uvedených v tabulce zaráží především obrovský vliv chyby v relativním časování na rovnoběžnou složku základny – nutno však říci, že tuto relativní chybu neznáme a hodnota v tabulce je pouze odhad pro chybu časování odpovídajícímu jednomu pixelu. Z toho lze soudit na požadavky na stabilitu oscilátorů na družici – a také na rozdíl taktovacích frekvencí mezi družicemi ERS-1 a ERS-2.

7 Výsledky

Posun snímků vůči sobě

Z analýzy tří snímků (více snímků není zatím k dispozici) vyplývá, že chyby v časování mají systematický charakter: všechny snímky mají stejný range-time a velmi podobnou chybu v něm (je možné, že rozdíl v range-time mezi ERS-1 a ERS-2 způsobuje fringe v obr. 5), chyba v azimut-time je mírně různá pro dva snímky z ERS-2 a naprosto odlišná u snímku z ERS-1. Podrobnější vyhodnocení těchto chyb včetně časové závislosti bude předmětem diplomové práce.

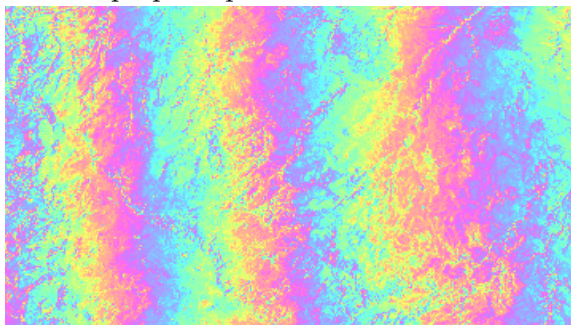
Posun interferogramu vůči geokódovanému DEM

Snímek se jeví pouze posunutý, natočení a změna měřítka není viditelná, podrobnější analýza bude též předmětem diplomové práce. Posunutí je cca 2 km v range směru a 4 km ve směru azimutu, obojí bylo opraveno změnou časování.

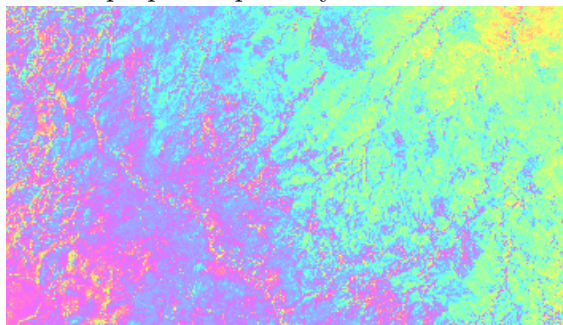
Reziduální fringe

Interferogram, který vznikl zpracováním topo páru s původním a opraveným časováním, je zobrazen v obrázku 5. Zpracováním defo páru vznikl podobný interferogram, není jej proto třeba uvádět.

topo pár s původním časováním

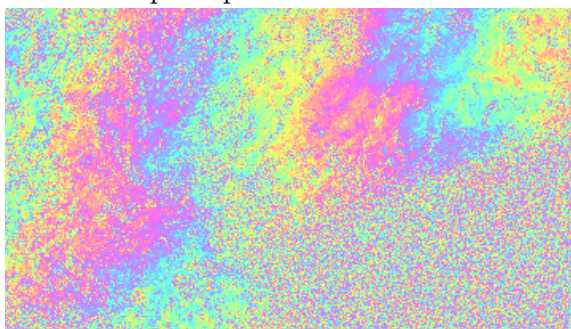


topo pár s opraveným časováním

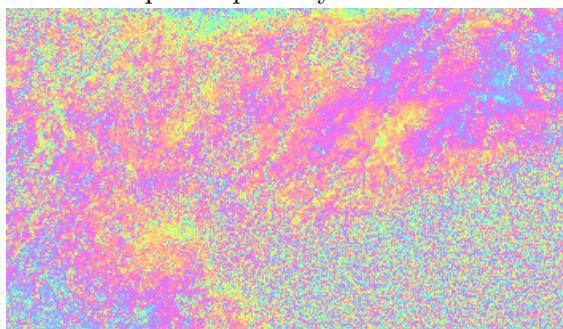


Obrázek 5: Topo interferogram s odečtenou topografií: zpracování pro původní a opravené časování. Reziduální fringe z velké části zmizely, zbylý trend lze přičíst buď chybám v poloze družic, nebo atmosférickému zpoždění. Jedná se o téměř celou scénu.

defo pár s původním časováním



defo pár s opraveným časováním



Obrázek 6: Defo interferogram s odečtenou topografií: zpracování pro původní a opravené časování. Reziduální fringe zde též z velké části zmizely.

8 Závěr

Opravou časování snímků se podařilo opravit chybu v georeferencování, což je zajisté největší přínos pro interferometrii, protože geokódování na základě amplitudového obrazu s nerovnoměrným rozlišením a identických bodů bylo neúspěšné.

Zajímavá je situace ohledně reziduálních fringů v interferogramu. Zde je překvapující především silná závislost reziduální fáze na relativní chybě v range-time: oscilátory musí být velmi stabilní a stejné na obou družicích. Chyba v časování master snímku způsobuje typicky chybu menší než nepřesnosti v drahách družic, jak bylo vyhodnoceno v [4]. Chyba z far-range aproximace je možná odstraněna v software DORIS: není vyloučeno, že se vodorovná složka základny počítá přímo jako rozdíl mezi vzdálenostmi družice–odražeč.

Reziduální fáze vzniká nepřesným odečtením tzv. flat-Earth fáze, tedy fáze odpovídající zemskému povrchu bez topografie. Na výpočet flat-Earth fáze má kromě polohy družic vliv také časování, jehož opravou docílíme z velké části eliminace reziduálního trendu.

Další práce se bude zabývat vlivem nepřesnosti v úhlu pohledu na reziduální fázi u 3-pass metody.

Reference

- [1] R. Bamler and B. Schättler. SAR data acquisition and image formation. In G. Schreier, editor, *SAR Geocoding: data and systems*, pages 53–102. Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1993.

- [2] E. Sansosti. Solution for the interferometric and stereo sar geolocation problem. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 42:1625–1634, 2004.
- [3] D. Small, C. Werner, and D. Nüesch. Baseline modelling for ERS-1 SAR interferometry. In *igarss93*, pages 1204–1206, 1993.
- [4] I. Čapková. Satellite orbit errors and their influence on interferograms. <http://gama.fsv.cvut.cz/~ivana/diplomka.pdf>, 2005. Diploma Thesis.