ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební Katedra mapování a kartografie

Metódy posúdenia kvality interferogramu

Diplomová práca



Diplomant: Vedúca diplomovej práce: Michal Girmala Doc. Ing. Lena Halounová, Csc.

Praha 2006

Prehlásenie

Záväzne prehlasujem , že som diplomovú prácu vypracoval samostatne a uviedol všetky použité zdroje .

V Prahe dňa16.5.2006

Michal Girmala

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcej diplomovej práce Doc. Ing. Lene Halounovej, Csc. a tiež asistentom Ing. Ivane Čapkovej a Ing. Danielovi Davidovi za cenné rady a odborné vedenie pri vypracovaní tejto práce. Poďakovať chcem aj všetkým svojím blízkym za pomoc a morálnu podporu, ktorú mi pri vypracovaní diplomovej práce poskytli.

Pri spracovaní boli použité dáta družice ERS poskytnuté Európskou Vesmírnou Agentúrou ESA. Na samotné spracovanie bol použitý open-source softvér DORIS. Pri niektorých ďalších výpočtoch bol použitý program MATLAB.

Abstrakt

Táto diplomová práca sa zaoberá radarovou interferometriou, konkrétne hodnotením kvality interferogramu a zdrojmi šumu a dekorelácie.

V prvej časti sú popísané všeobecné princípy tejto metódy, jej použiteľnosť a spôsob spracovania.

Druhá časť sa bližšie zaoberá hodnotením kvality interferogramu, popisuje jednotlivé metódy výpočtu koherencie a metódu kvantitatívneho vyhodnotenia kvality interferogramu na základe fázových rozdielov. Ďalej sú v tejto práci popísané zdroje a príčiny šumu a dekorelácie, a tiež je analyzovaný vplyv časovej a kolmej základne na výsledný interferogram.

Abstract

This diploma thesis deals with radar interferometry, especially with evaluation of quality InSAR interferograms and sources of noise and decorelation.

First part contains description of general principles of this method, its usability and the way of processing.

Second part is aimed at evaluation of quality of interferograms, describes individual methods of coherence estimation and method of quantitative measure for quality of interferograms based on phase differences. This work further describes sources and reasons of noise and decorelation, and also analyzes influence of time and perpendicular baseline on interferogram.

Obsah

1 Úvod	
2 SAR Interferometria	
2.1 Vznik a vývoj	
2.2 Základné princípy a pojmy	
2.2.1 Charakteristika elektromagnetickej vlny	
2.2.2 Charakteristiky dráhy družice	
2.2.3 Časová a priestorová základňa	
2.2.4 SAR obraz	14
2.2.5 Technické parametre systému SAR	
2.3 Geometria a vznik obrazu	
2.3.1 Geometrické informácie obsiahnuté v interferograme	
2.3.2 Reliéf	
2.3.3 Chyby spôsobené členitosťou reliéfu	
2.3.4 Meranie zmien povrchu - DInSAR	21
2.4 Využitie radarovej interferometrie	
3 Metódy a postup interferometrického spracovania	
3.1 Metódy interferometrického merania	
3.1.1 Tvorba DMT	
3.1.2 Diferenčná interferometria	
3.2 Postup interferometrického spracovania	
3.2.1 Výber snímkov	
3.2.2 Predspracovanie	
3.2.3 Koregistrácia a filtrácia	
3.2.4 Interpolácia a prevzorkovanie	
3.2.5 Tvorba interferogramu	
3.2.6 Odstránenie referenčnej fázy (flat-Earth phase)	
3.2.7 Výpočet koherencie	
3.2.8 Výpočet a odpočet fázy zodpovedajúcej digitálnemu m	odelu terénu 34
3.2.9 Filtrácia fázy	
3.2.10 Rozbalenie fázy	
3.2.11 Tvorba diferenčného interferogramu	
3.2.12 Georeferencovanie	
4 Základy pravdepodobnostného modelu InSAR	37
4.1 Charakteristiky náhodnej veličiny	
4.2 Vzťah medzi koherenciou a koreláciou	
4 3 Štatistická stabilita	38
4.4 Vzťah medzi koherenciou a fázovým šumom	
4.5 Vzťah medzi koherenciou a SNR	
5 Zdroje dekorelácie a fázováho šumu	А 1
5 1 Fázové chyby	
5 1 1 Zanedbateľné chyby	
	······································

5.1.2 Tepelná dekorelácia	
5.1.3 Geometrická dekorelácia	
5.1.4 Dekorelácia spôsobená Dopplerovým centroidom	45
5.1.5 Časová dekorelácia	
5.1.6 Dekorelácia spôsobená spracovaním	46
5.1.7 Vplyv atmosféry	
5.2 Metrologické chyby	49
6 Hodnotenie kvality interferogramu	51
6.1 Kvalitatívne hodnotenie interferogramu	51
6.1.1 Koeficient koherencie a jeho vlastnosti	51
6.1.2 Výberová koherencia	53
6.1.3 Odhad koherencie v štatisticky nestabilných oblastiach	56
6.1.4 Odhad koherencie korigovaný o topografickú fázu	59
6.2 Kvantitatívne hodnotenie kvality interferogramu	59
6.2.1 Kvantitatívne vyhodnotenie koherencie	
6.2.2 Kvantitatívna hodnotania kvality, založaná na fázových rozdialoch	60
0.2.2 Kvantitativne hounoteme kvanty, založene na razových rožuleloch	
 7 Porovnanie metód hodnotenia kvality interferogramu 	
 7 Porovnanie metód hodnotenia kvality interferogramu	
 7 Porovnanie metód hodnotenia kvality interferogramu	
 7 Porovnanie metód hodnotenia kvality interferogramu 7.1 Porovnanie metód 7.1.1 Výpočet SPD 7.1.2 Výpočet koherencie 	
 7 Porovnanie metód hodnotenia kvality interferogramu	
 7 Porovnanie metód hodnotenia kvality interferogramu 7.1 Porovnanie metód 7.1.1 Výpočet SPD 7.1.2 Výpočet koherencie 7.1.3 Porovnanie 7.2 Časová základňa 	
 7 Porovnanie metód hodnotenia kvality interferogramu	
 7 Porovnanie metód hodnotenia kvality interferogramu 7.1 Porovnanie metód 7.1.1 Výpočet SPD 7.1.2 Výpočet koherencie 7.1.3 Porovnanie 7.2 Časová základňa 7.3 Priestorová základňa 	
 7 Porovnanie metód hodnotenia kvality interferogramu 7.1 Porovnanie metód 7.1.1 Výpočet SPD 7.1.2 Výpočet koherencie 7.1.3 Porovnanie 7.2 Časová základňa 7.3 Priestorová základňa 8 Záver 	
 7 Porovnanie metód hodnotenia kvality interferogramu	
 7 Porovnanie metód hodnotenia kvality interferogramu 7.1 Porovnanie metód 7.1.1 Výpočet SPD 7.1.2 Výpočet koherencie 7.1.3 Porovnanie 7.2 Časová základňa 7.3 Priestorová základňa 8 Záver 9 Použitá literatúra 	
 7 Porovnanie metód hodnotenia kvality interferogramu	
 7 Porovnanie metód hodnotenia kvality interferogramu	

Úvod

SAR interferometria je v súčasnosti veľmi dynamicky sa rozvíjajúcou metódou, hlavne vďaka výborným výsledkom dosiahnutým v rôznych oblastiach ako napríklad monitorovanie zemetrasení, vulkanickej činnosti, zosuvov a poklesov pôdy, sledovanie dynamiky ľadovcov a v neposlednom rade tvorbe digitálneho modelu terénu (DMT) zemského povrchu a klasifikácii rôznych typov povrchu.

SAR – radar so syntetickou apretúrou - je mikrovlnný systém zobrazujúci zemský povrch. Ide o aktívny systém, a preto môže operovať počas dňa aj noci. Vďaka využívaniu mikrovĺn je schopný mapovať zemský povrch aj cez mraky, dážď, alebo hmlu. Na rozdiel od klasického radarového merania, kde sa meria čas a amplitúda signálu, je nositeľom informácie u SAR interferometrie amplitúda a hlavne fáza žiarenia.

Odpočítaním fázových hodnôt zodpovedajúcich si pixelov jedného snímku od druhého získame interferogram. Interferogram je obraz, v ktorom jednotlivé pixely sú hodnotami interferometrickej fáze v rozmedzí 0 - 2π . Obraz je tvorený farebnými interferometrickými prúžkami pripomínajúcimi vrstevnice. Dvoma základnými zložkami obsiahnutými v interferograme sú informácie o polohe a členitosti terénu a informácia o jeho deformácii. Voľbou vhodného postupu je možné jednotlivé zložky od seba oddeliť, čím získame buď obraz reliéfu terénu, kde výškový rozdiel medzi dvoma prúžkami závisí na geometrii snímania, alebo obraz časovej deformácie terénu, kde vzdialenosť medzi prúžkami u družíc ERS je 2.8cm.

Interferometrická metóda umožňuje vytvorenie digitálneho modelu terénu s presnosťou v metroch až desiatkach metrov a určenie deformácií terénu s presnosťou pod 1cm.

Presnosť digitálneho modelu terénu a určenia deformácii je závislá na kvalite generovaného interferogramu, ktorý vzniká komplexným násobením zodpovedajúcich si pixelov v dvoch datasetoch.

Interferogram je ovplyvnený celým radom nežiaducich vplyvov, napríklad atmosférou, chybami dráh družíc, alebo nevhodným typom povrchu, výsledkom čoho môže byť dekorelácia oblasti a obraz znehodnotený šumom. Časť týchto nežiaducich vplyvov sa dá odstrániť vhodným výberom dát, alebo vhodným postupom, výsledný interferogram je však aj napriek tomu vždy zaťažený istým množstvom chýb. Z vyššie uvedených dôvodov je preto nevyhnutné zavedenie spôsobu na posúdenie kvality interferogramu.

Jednou z možností je vizuálna kontrola. Vizuálne sa dajú rozpoznať interferogramy obsahujúce čisté prúžky, ktoré signalizujú dobrú kvalitu interferogramu, na druhej strane škvrnité prúžky sa nachádzajú u zlých interferogramoch.

Iným indikátorom kvality je stupeň koherencie. Koherencia medzi dvoma SAR snímkami môže byť definovaná ako korelačný koeficient medzi dvoma zodpovedajúcimi si pixelmi a pohybuje sa od 0 do 1. Mapa koherencie sa počíta pomocou pohyblivého okna, ktoré sa pohybuje nad oboma snímkami. Stupeň koherencie sa dá použiť na hodnotenie kvality interferogramu, to znamená, že čím vyššia je koherencia, tým vyššia je kvalita. Odhad koherencie je však vždy nejako skreslený. Nájsť spôsob neskresleného odhadu koherencie môže byť problematické, a preto existujú rôzne metódy výpočtu.

Ďalším spôsobom určenia kvality interferogramu je metóda založená na fázových rozdieloch. Jednotlivé pixely v interferograme predstavujú fázové hodnoty. V dokonalom interferograme by fázová zmena mala prebiehať postupne, a preto fázový rozdiel susediacich pixelov by mal byť malý, to znamená, že aj suma všetkých fázových rozdielov by mala byť malá. Čím nižšia je potom suma fázových rozdielov, tým väčšia by mala byť kvalita interferogramu.

Konkrétne zdroje dekorelácie a odhady kvality interferogramu budú podrobnejšie analyzované v tejto práci. Jednotlivé metódy budú otestované na konkrétnych príkladoch z oblasti severných Čiech.

2 SAR Interferometria

2.1 Vznik a vývoj

Princíp interferencie elektromagnetického žiarenia objavil už dávno Christiaan Huygens (1629-1695), k jeho využitiu v diaľkovom prieskume zeme, konkrétne v SAR interferometrii, však došlo až na konci 20-teho storočia. Koncom 70-tych rokov začali vesmírne zobrazujúce radary hrať významnú úlohu v diaľkovom prieskume zeme. Bolo jasné, že doterajšie radary SLAR (side looking aperture radar) nemajú dostatočnú rozlišovaciu schopnosť, aby mohli byť umiestnené na vesmírne nosiče (ich rozlišovacia schopnosť závisela od veľkosti antény), a preto bol vyvinutý nový druh radaru SAR (synthetic aperture radar), ktorého rozlíšenie sa dalo zvýšiť inak ako zväčšením antény a to využitím iba úzkej časti pulzu pomocou Dopplerovského princípu.

V roku 1978 NASA vypustila satelit SEASAT, ktorého súčasťou bol takýto radar. Kvôli skratu však satelit po 105 dňoch zlyhal. Aj keď základné princípy SAR interferometrie boli známe už na začiatku 70-tych rokov, prvé praktické pozemské výsledky boli zverejnené až v 80-tych rokoch, pretože jediné dáta dostupné v tom čase pochádzali práve z misie SEASAT. Nasledovali misie raketoplánov SIR-A v roku 1981 a SIR-B v roku 1984.

Súčasne s výskumom SAR radarov umiestnených na kozmických nosičoch prebiehal aj vývoj SAR nesených leteckými nosičmi (napr. STAR-1).

Už po prvých misiách bolo jasné, že SAR dokáže vierohodne mapovať zemský povrch a získavať informácie o jeho fyzikálnych vlastnostiach. Preto sa o využitie SAR a interferometrie začali zaujímať ďalšie krajiny. Bývalý Sovietsky zväz vypustil družicu COSMOS – 1987, ktorá obiehala vo výške 270km po dobu 2 rokov. Po vypustení družice ERS-1 v roku 1992 Európskou Vesmírnou Agentúrou sa sprístupnilo veľké množstvo dát vhodných na interferometrické spracovanie a touto metódou sa s úspechom začalo zaoberať veľké množstvo odborníkov. Nasledovalo vypustenie satelitu ERS-2 v roku 1995 tiež agentúrou ESA.



Obr.č. 1 - družica ERS-2

Kanada začala s obdobným programom v roku 1980, ktorý vyústil vypustením satelitu RADARSAT v roku 1995.

Japonsko vypustilo vlastný satelit JERS-1 nesúci senzor SAR v roku 1992, ktorý ukončil svoju misiu v roku 1998. Po ňom v roku 1999 nasledoval JERS-2 operujúci dodnes.

V roku 1994 pokračovali misie raketoplánov, vypustený bol satelit SIR-C/X-SAR. Tento senzor bol vyvinutý za spolupráce Nemecka a Talianska a bol to prvý radar, ktorý operoval v 3 pásmach – L,C,X. Na začiatku roku 2000 uskutočnila NASA misiu raketoplánu ENDEAVOUR, ktorý za 11 dní zmapoval 80 % povrchu Zeme, výsledkom čoho bol veľmi presný a globálny model Zeme.

V marci 2002 ESA vyslala satelit ENVISAT obsahujúci mimo iného aj ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar - vylepšený SAR), čím nadviazala na úspešnú misiu ERS 1,2.

2.2 Základné princípy a pojmy

Základom interferometrie je radar SAR, ktorý vysiela smerom k zemskému povrchu elektromagnetické pulzy a zaznamenáva ich odrazy. V odrazenom žiarení je zachytená informácia o fáze a amplitúde vlnenia.

2.2.1 Charakteristika elektromagnetickej vlny

Vlnová dĺžka λ je vzdialenosť medzi dvoma po sebe nasledujúcimi bodmi na vlne, ktoré majú rovnakú amplitúdu a fázu. Je to základná vlastnosť, ktorou sa od seba jednotlivé druhy žiarenia odlišujú (svetlo, UV, IR, mikrovlny,).

Amplitúda je maximálna výchylka vlny nad, alebo pod nulovú hodnotu. Táto veličina popisuje silu (intenzitu) vlnenia. Amplitúda odrazeného žiarenia závisí na vlastnostiach povrchu, čo sa využíva pri mapovaní polohy a odrazových vlastností povrchu. Výsledkom je rastrový čiernobiely obraz povrchu, kde odtieň sivej závisí na type povrchu. Povrch s vysokou mierou odrazivosti sa zobrazí ako svetlý a s nízkou ako tmavý.

Fáza je hodnota relatívnej polohy na vlne v určitom čase vzhľadom k počiatku vlnenia a nadobúda hodnotu od $-\pi$ do π . Fáza odrazeného žiarenia je závislá na vzdialenosti medzi zdrojom žiarenia a miestom odrazu. Práve táto vlastnosť, pri použití minimálne dvoch snímkov, sa používa pri tvorbe interferogramu.



Obr.č. 2 - charakteristiky vlny

2.2.2 Charakteristiky dráhy družice

Interferometrické dáta sú získavané radarom SAR, ktorý je umiestnený na kozmickom (prípadne leteckom) nosiči. Nosič sa pohybuje po obežných dráhach, pričom smer pohybu sa nazýva *azimut, alebo pozdĺžny smer*. Smer kolmý k smeru letu sa nazýva *range (ground range), alebo priečny smer*.

Anténa radaru sníma povrch šikmo v rovine kolmej (približne) k smeru letu. Šikmý smer snímania umožňuje vyššie rozlíšenie. Tento uhol medzi zemskou normálou a smerom vysielania vĺn k povrchu sa nazýva *uhol pohľadu (off-nadir)* a je odlišný pre každú družicu. Zvyčajne sa pohybuje od 20 – 60 stupňov. Uhol medzi zemskou normálou a radarovým lúčom v mieste ožiarenia povrchu sa nazýva *uhol dopadu (incidence angle)* a z dôvodu zakrivenia Zeme je väčší ako uhol pohľadu. Smer pozdĺž línie pohľadu sa označuje ako *šikmý smer (slant-range direction)*.

Pri prelete družice sníma radar povrch v páse rovnobežnom so smerom letu, ktorý sa nazýva *stopa antény*.



Obr.č. 3 - charakteristiky dráhy družice a snímania povrchu

2.2.3 Časová a priestorová základňa

Pre vytvorenie interferogramu potrebujeme mať k dispozícii aspoň dva snímky daného územia. Snímky môžu byť získané buďto dvoma satelitmi, alebo jedným satelitom pri opakovanom prelete nad daným miestom. Priestorová vzdialenosť, kolmá na smer letu, medzi dvoma družicami, alebo dvoma polohami tej istej družice v čase vytvorenia snímku daného územia je *priestorová základňa (spatial baseline)*. Väčšia priestorová základňa znamená presnejšie určenie výšky. To platí iba po určitú hranicu, po prekročení ktorej dôjde k dekorelácii.

Priestorová základňa sa ďalej rozkladá na dve zložky. Najčastejšie sú to *rovnobežná základňa (paralel baseline)*, ktorá je rovnobežná so smerom vyslaného lúča *a kolmá základňa (perpendicular baseline)*, ktorá je k tomuto lúču kolmá.



Obr.č. 4 – rovnobežná a kolmá základňa

 θ – uhol pohľadu, B
⊥ -kolmá základňa, B $_{||}$ - rovnobežná základňa,

R1 a R2 – vzdialenosti od družíc k povrchu, α – uhol viď obr.č.4, prevzaté z [3]

Rovnobežná a kolmá základňa sa dajú vyjadriť:

$$\mathbf{B}_{\parallel} = \mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2 = \mathbf{B} \sin(\theta - \alpha), \tag{2.1}$$

$$B \perp = B \cos(\theta - \alpha). \tag{2.2}$$

Časový rozdiel medzi dobou uskutočnenia prvého a druhého snímku označujeme ako *časovú základňu (temporal baseline)*. Zväčšenie časovej základne spôsobí zvýšenie dekorelácie určitých oblastí a tiež nárast deformačnej zložky (v prípade, že k nej došlo).

2.2.4 SAR obraz

SAR obraz je tvorený malými obrazovými časťami – pixelmi, ktoré sú usporiadané do riadkov a stĺpcov. Pri snímaní senzor postupne sníma jednotlivé pixely v riadku od najbližšieho po najvzdialenejší. Po nasnímaní celého riadku sa začne zaznamenávať ďalší. Takto sú aj jednotlivé pixely indexované, pričom sa udáva poloha pixelu v rámci riadku a číslo riadku, v ktorom sa nachádza.

Každý pixel nesie informáciu o amplitúde a fáze, ktorá je zaznamenaná v podobe komplexného čísla. Táto informácia závisí na odrazových vlastnostiach povrchu, ktorý je daným pixelom reprezentovaný a na jeho vzdialenosti od nosiča.

Rozlíšenie v smere azimutu a range je závislé na vlastnostiach SAR systému. Rozlíšenie v smere kolmom na smer letu je dané dĺžkou pulzu. Rozlíšenie v smere letu je závislé na vzdialenosti od radaru a šírke vyslaného pulzu, ktorý je určený veľkosťou antény. U SARu je rozlíšenie v tomto smere zvýšené využitím Dopplerovského princípu, ktorý umožňuje využiť iba úzku časť šírky lúča.

Pri interferometrii sa používajú dva snímky (prípadne viac), z ktorých prvý sa nazýva *master image* a druhý *slave image*.

2.2.5 Technické parametre systému SAR

Jednotlivé SAR systémy sa od seba odlišujú rôznymi technickými parametrami. Asi najvýznamnejším parametrom je frekvencia (prípadne vlnová dĺžka) použitého žiarenia. Podľa použitej frekvencie sa radary delia do rôznych pásiem. Pre európske družice ERS a kanadský

RADARSAT je to napríklad pásmo C – 5,3 GHz. Japonské družice J–ERS využívajú pásmo L – 1,2 GHz a pre nemecko-talianske misie X-SAR to bolo pásmo X – 10 GHz. Na vlnovej dĺžke je závislá presnosť diferenčného interferogramu, presnosť digitálneho modelu terénu a tiež sa menia odrazové vlastnosti žiarenia. Pri menších vlnových dĺžkach dochádza k odrazu už od povrchu vegetácie (pásmo X), naopak pri väčších vlnových dĺžkach sa žiarenie odráža až od zemského povrchu (pásmo L), prípadne až z oblastí pod povrchom.

K ďalším parametrom patrí napríklad uhol pohľadu. Obraz vzniknutý pod väčším uhlom má lepšie rozlíšenie. Zväčšovaním uhlu pohľadu však dochádza k nárastu iných chýb, a preto sa tento uhol pohybuje od 20 – 60 stupňov. Napríklad pre ERS je to 23 stupňov, RADARSAT má možnosť 23-59 stupňov.

Šírka záberu sa pohybuje rádovo v desiatkach až stovkách kilometrov. U družíc ERS je to 100 km, u RADARSATU 45-500km.

Niektoré systémy umožňujú rôznu polarizáciu vysielaného žiarenia, čo sa odzrkadlí na zistených odrazových vlastnostiach povrchu. Táto vlastnosť sa dá využiť pri klasifikácii typov povrchu. Dôležitou je aj obežná doba družice a tiež termínové rozlíšenie, ktoré udáva ako často letí družica po tej istej obežnej dráhe. Od toho závisí ako často môže byť dané územie snímkované. V prípade snímkovania jednou družicou to ovplyvňuje koherenciu medzi snímkami a tiež rast deformačnej zložky, ktorá je závislá na čase.

2.3 Geometria a vznik obrazu

Ako už bolo vyššie uvedené, na interferometrický výpočet potrebujeme minimálne dva snímky toho istého územia. V prípade topografického mapovania musia byť tieto snímky vytvorené pod mierne odlišným uhlom.

Pre fázu v každom pixely môžeme písať:

$$\boldsymbol{\varphi} = \boldsymbol{\varphi} \text{ specific} + \boldsymbol{\varphi} \text{ dist} \tag{2.3}$$

 ϕ_{dist} – je fáza, ktorá je závislá na vzdialenosti družice – odrážač

 $\phi_{specific}$ – je fáza, ktorá obsahuje ostatné vplyvy iné ako ϕ_{dist} , napr. chyby spôsobené pri prechode signálu od družice k povrchu a späť, nedá sa jednoznačne určiť

$$\varphi_{dist} = \frac{2\pi}{\lambda} R_{(tam - spät')} = \frac{4\pi}{\lambda} R$$
(2.4)

R - vzdialenosť od antény k odrážaču na zemi

λ – vlnová dĺžka použitého mikrovlnného žiarenia

V prípade , že máme 2 snímky územia, ktoré sa nezmenilo a sú nasnímané v krátkom čase (atmosféra sa nezmenila) tak platí - $\phi_{specific1} = \phi_{specific2 a potom}$:

$$\Delta \varphi = \frac{4\pi}{\lambda} (R1 - R2) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \tag{2.5}$$

 $\Delta r = R1 - R2 - je \text{ rozdiel vzdialenosti}$

Obraz zložený z hodnôt $\Delta \phi$ sa nazýva *interferogram*.



Obr.č. 5 – geometria snímania a výpočet fázy, obr. prepracovaný z [2]

$$\delta \varphi_A = \frac{4\pi}{\lambda} [R(2,A) - R(1,A)] , \ \delta \varphi_B = \frac{4\pi}{\lambda} [R(2,A) - R(1,B)]$$
(2.6)

Zmena interferometrickej fázy medzi bodmi A a B, ktoré majú zhodnú šikmú vzdialenosť na radarovom snímku vytvorenom družicou 1, má potom hodnotu [2] :

$$\Delta \varphi = \delta \varphi_A - \delta \varphi_B = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \tag{2.7}$$

Pri SAR interferometrii uskutočňovanej z vesmíru platí, že vzdialenosť R je veľmi veľká a zmena uhlu pohľadu veľmi malá. Preto môžeme Δr vyjadriť ako:

$$\Delta r = \delta \theta \frac{q}{\sin(\theta)} = \frac{B_{\perp} q}{R \sin(\theta)}$$
(2.8)

 θ – uhol pohľadu

 $\delta \theta$ – zmena uhlu pohľadu

q - zmena výšky susedného odrážača

veličiny sú dobre pochopiteľné z obr.č.4

A následne pre $\Delta \phi$ platí :

$$\Delta \varphi = \frac{4\pi B \perp q}{\lambda R \sin(\theta)} \tag{2.9}$$

2.3.1 Geometrické informácie obsiahnuté v interferograme

Výsledný interferogram je tvorený hodnotami $\Delta \phi$. Na hodnotu tejto veličiny vplýva viacero faktorov, a preto môžeme $\Delta \phi$ rozložiť na niekoľko zložiek.

$$\Delta \boldsymbol{\varphi} = \boldsymbol{\varphi} E + \boldsymbol{\varphi} tpg + \boldsymbol{\varphi} err \tag{2.10}$$

 ϕ_E – je fáza zodpovedajúca plochej zemi. (flat earth phase)

 ϕ_{tpg} – je fáza tvorená topografiou a je ovplyvnená geometriou snímkovania a to hlavne priestorovou základňou.

 ϕ_{err} – je zložka tvorená atmosferickými poruchami, deformáciou terénu a ďalšími chybovými vplyvmi.

Fáza plochej Zeme (Flat Earth Phase) je zložka fázy spôsobená povrchom Zeme bez reliéfu. Na interferograme rovinného povrchu by sa tento vplyv prejavil ako rovnobežné interferometrické prúžky. Pri tvorbe topografického alebo diferenčného interferogramu by sa táto

zložka pripočítala k deformačnej alebo topografickej, čo by spôsobilo skreslenie výslednej informácie, a preto je nutné fázu plochej Zeme pri tvorbe interferogramu odstrániť.

Po odstránení vplyvu referenčnej fázy sú v interferograme zahrnuté nasledujúce geometrické informácie:

- *informácia o odrazivosti* záznam amplitúdy odrazeného žiarenia umožňuje kvôli odlišným odrazovým vlastnostiam jednotlivých objektov polohovo mapovať povrch.
- *informácia o zmene polohy alebo pohybe*. Ak medzi vytvorením *master a slave* snímku došlo v danom území k deformácií, alebo zmene polohy, táto informácia sa prejaví v interferograme. Plynulá deformácia je závislá na časovej základni, to znamená, že čím viac času prešlo medzi uskutočnením prvého a druhého snímku, tým k väčšej zmene pravdepodobne došlo. Radar je schopný zachytiť veľmi jemné zmeny polohy v smere pohľadu.
- *informácia o vplyve atmosféry*. Atmosféra je veľmi dynamický systém, ktorý sa v čase rýchlo mení, a preto má prechádzajúci signál vždy odlišné podmienky. Oneskorenie signálu napríklad spôsobí, že sa daný bod zobrazí vyššie ako v skutočnosti je. Odstránenie tohto vplyvu je v praxi veľmi komplikované. Naopak pri známom reliéfe terénu sa táto zložka dá využiť pri určovaní charakteristík atmosféry pre meteorologické účely.
- *informácia o topografii*. Pri vytvorení interferogramu zo snímkov s inou ako nulovou priestorovou základňou, dôjde k zachyteniu informácie o členitosti terénu. Zväčšenie základne spôsobí zvýšenie citlivosti na členitosť reliéfu. Základňa však nemôže byť ani príliš veľká, pretože by došlo k dekorelácii. Celkovo je však citlivosť na členitosť oveľa menšia ako citlivosť na deformáciu terénu.

Zvyškové chyby v interferograme sú spôsobené napr. chybami dráh družíc (nepresnosťou pri určení ich polohy) atmosférou, šumom a dekoreláciou.

2.3.2 Reliéf

V prípade, že medzi vytvorením 1. a 2. snímku nedošlo k deformácii povrchu, bude interferogram obsahovať iba topografickú zložku a podľa obrázka č. 4 a vzorca (2.9) môžme písať :

$$q = \frac{\lambda \sin(\theta)}{4\pi \,\delta\theta} \Delta \varphi \tag{2.11}$$

kde $\delta \theta = B \perp / R$

q – zmena výšky susedného odrážača, význam ostatných členov je jasný z obr.č.4

Výškový cyklus (altitude of ambiguity) je definovaný ako výškový rozdiel \mathbf{q}_{a} , ktorý po sploštení interferogramu vytvorí fázový rozdiel 2π . Táto výšková nejednoznačnosť je nepriamo úmerná veľkosti kolmej základne B \perp .

$$\Delta \varphi = 2\pi \Longrightarrow h = \frac{\lambda \sin(\theta)}{2\delta \theta} = \frac{\lambda R \sin(\theta)}{2B \perp}$$
(2.12)

a z toho

$$q_a = \frac{\lambda R \sin(\theta)}{2B \perp}$$
(2.13)

Dosadením potrebných parametrov pre družice ERS ($\lambda = 5,6$ cm, $\theta = 23^{\circ}$, R = 850 km) potom môžeme vzťah 2.13 zjednodušiť na:

$$q_a = \frac{9300}{B\,\bot} [m] \tag{2.14}$$

Z vyššie uvedených vzťahov je zrejmé, že výškový cyklus je úmerný veľkosti kolmej základne. S rastúcou kolmou základňou rastie aj citlivosť na výškovú členitosť terénu, súčasne však dochádza k zvýšeniu podielu šumu v interferograme, čím interferometrické prúžky strácajú denzitu (ostrosť) a celý obraz sa stáva zašumený a ťažko interpretovateľný. Po prekročení určitej hranice sa obraz stáva natoľko dekorelovaný, že interferometrické spracovanie už nie je možné.

V prípade, že je daný systém vybavený možnosťou operovať vo viacerých pásmach, je možné docieliť zmenu výškového cyklu prepnutím do režimu s inou vlnovou dĺžkou. To znamená, že kratšia vlnová dĺžka spôsobí zvýšenie citlivosti, naopak pri väčšej vlnovej dĺžke dôjde k poklesu citlivosti (zväčšeniu výškového cyklu).

Zvýšenie citlivosti je možné dosiahnuť aj zmenou uhlu pohľadu celého systému, alebo zmenšením vzdialenosti SAR systému od povrchu, čím však dôjde aj k zvýšeniu vplyvu chýb spôsobených členitosťou terénu, a preto je aj v tomto prípade nutné nájsť optimálnu konfiguráciu. Z toho vyplýva, že q_a sa mení aj v rámci jedného snímku, čo je spôsobené odlišným uhlom pohľadu a meniacou sa dĺžkou R. Vďaka úzkej šírke vyslaného pulzu a malej

zmene uhlu pohľadu je pre praktické účely (selekcia a porovnanie dát) možné túto charakteristiku aproximovať jednou hodnotou pre snímok.

2.3.3 Chyby spôsobené členitosťou reliéfu

Z dôvodu šikmého pohľadu radaru výšková členitosť spôsobí geometrické poruchy vo výslednom SAR obraze. Ich vplyv je znázornený na nasledujúcom obrázku.



Obr.č. 6 – chyby spôsobené nadmorskou výškou terénu

Tieň (shadow) – z územia, ktoré je úplne zakryté (zatienené) pred dopadom mikrovlnného žiarenia nedochádza k žiadnemu odrazu. Táto chyba sa najviac prejavuje v strmých terénoch pri snímaní pod veľkým uhlom pohľadu. Veľkosť tieňa však môže na základe známej geometrie poslúžiť aj na určenie výšky objektu.

Zahustenie (forshortening) dáta z územia o väčšej ploche, ktorej body majú takmer rovnakú vzdialenosť od radaru, sú zhustené zaznamenaním do malej plochy – dochádza k veľkému odrazu. K najväčšiemu zhusteniu dochádza, ak je strmý svah kolmý k radarovému lúču.

Prekrytie (layover) – ide o extrémny prípad zhustenia, ku ktorému dochádza, ak je uhol pohľadu menší ako lokálny sklon svahu. Prekrytie dát je spôsobené rovnakou vzdialenosťou viacerých miest na Zemi k radaru.

Ak je pre dané územie známy digitálny model terénu je možné tieto chyby čiastočne opraviť geometrickými korekciami, nedajú sa však odstrániť úplne. Z dôvodu nižších výšok a väčších uhlov pohľadu sa tieto chyby výraznejšie prejavia u SAR nesených na leteckých nosičoch.

Pozemné súradnice interferometrického obrazu sa vzťahujú zvyčajne k systému WGS-84, ktorého referenčnou plochou je elipsoid. K tomuto systému sa vzťahujú aj interferometrické výšky. K vytvoreniu ortometrických výšok, ktoré sa vzťahujú ku geoidu, je nutné vypočítať rozdiel medzi elipsoidom a geoidom. Tento výpočet potom môže zaviesť chybu do ortometrických výšok. Našťastie v územiach, kde sa rozdiel medzi geoidom a elipsoidom mení pomaly, je táto chyba zanedbateľná.

2.3.4 Meranie zmien povrchu - DInSAR

Pri použití geometrie snímkovania s opakovaným preletom po tej istej dráhe je jasné, že ak sú snímky vytvorené v odlišných časoch a v teréne došlo k zmene polohy daného bodu v šikmom smere (range), spôsobí to dodatočné zmeny hodnoty nameranej fáze. Ak je druhý snímok vytvorený z rovnakej pozície ako prvý, zmena výslednej fázy by mala byť spôsobená výhradne pohybom zobrazovaného bodu k alebo od antény (v prípade, že nezohľadňujeme zmeny spôsobené pri prechode signálu atmosférou) [6].



Obr.č. 7 – zmena fázy spôsobená poklesom povrchu, obr. prevzatý z [7]

Pre zmenu interferometrickej fázy potom môžeme písať:

$$\Delta \varphi_d = \frac{4\pi}{\lambda} d \tag{2.15}$$

d – posun odrážača v šikmom smere (slant range)

V praxi však väčšinou nie je možné vytvoriť dva snímky z úplne rovnakej pozície. Nanešťastie nenulová základňa vždy spôsobí, že interferogram bude okrem deformácie citlivý aj na reliéf terénu. Z toho dôvodu boli na skonštruovanie diferenčného interferogramu vytvorené viaceré metódy, ktoré budú bližšie popísané v kapitole 3.

Pre celkovú interferometrickú fázu obsahujúcu topografickú aj deformačnú zložku potom platí:

$$\Delta \varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp} q}{R \sin(\theta)} + \frac{4\pi}{\lambda} d \qquad (2.16)$$

Pri známom digitálnom modele terénu potom môžme prvý člen rovnice odpočítať, čím získame diferenčný interferogram, v ktorom jednotlivé interferometrické prúžky vyjadrujú deformáciu, ktorá v danom území vznikla.

Zmena polohy v šikmom smere range a veľkosti $\lambda/2$ potom spôsobí fázovú zmenu o veľkosti jedného cyklu, čo sa na interferograme prejaví ako jeden interferometrický prúžok. Pre mikrovlnné pásmo C (5.2GHz) používané družicami ERS takáto zmena zodpovedá veľkosti 28 mm. Pre porovnanie, k vytvoreniu topografického prúžku sa výška musí zmeniť o výškový cyklus q_a, čo spôsobí fázovú zmenu jedného cyklu. Pri kolmej základni 100m to pri družici ERS zhruba odpovedá výškovej zmene 70m. .

2.4 Využitie radarovej interferometrie

Zemský povrch bol v priebehu miliónov rokov vyformovaný geologickými a eróznymi procesmi až do dnešnej podoby. Meranie morfológie povrchu Zeme a jeho zmien je kľúčovým krokom pre pochopenie týchto procesov a tiež pre plánovanie rôznych ľudských aktivít, ako napríklad budovanie sídel, infraštruktúry, alebo úpravy krajiny. A práve mapovanie reliéfu

a zmien spôsobených v dôsledku zemetrasení, vulkanickej činnosti, alebo zosuvov pôdy je hlavnou oblasťou aplikácie radarovej interferometrie.

Tvorba digitálneho modelu terénu pred použitím InSAR bola veľmi zdĺhavá a často nákladná. Prvé DMT vznikali digitalizáciou topografických máp a interpoláciou výšok z nameraných hodnôt. Zber takýchto dát prebiehal priamym meraním v teréne, čo si vyžadovalo prácu veľkého množstva ľudí počas dlhého obdobia.

Zavedenie leteckej stereo fotogrametrie celý proces výrazne urýchlilo. Hlavným problémom optických zobrazovacích systémov však je oblačnosť, ktorá znemožňuje snímkovanie Zeme a prípadný nedostatok kontrastných javov, čo znemožňuje priradzovanie bodov stereo snímkov, napríklad u rozsiahlych zalesnených, ľadovcových alebo púštnych oblastí.

Veľkou výhodou InSAR oproti ostatným metódam sú žiadne alebo minimálne nároky na manuálnu voľbu pozemných kontrolných bodov, schopnosť výškového merania v oblastiach bez kontrastných znakov a snímkovania cez oblačnosť a v tme. Kozmické InSAR systémy nie sú jediným spôsobom vhodným na získanie vysokokvalitných DMT zemského povrchu, dokážu ho však mapovať globálne a to časovo a ekonomicky veľmi výhodným spôsobom [6]. Príkladom môže byť misia SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) agentúry NASA, pri ktorej bolo z raketoplánu za 11 dní zmapovaných 80% zemského povrchu a z toho okolo polovica územia bola nasnímkovaná viac ako dvakrát. Spracovanie takto veľkého množstva dát trvalo 2 roky a maximálna presnosť digitálneho modelu terénu dosahuje 15 metrov v polohe a 12 metrov vo výške.

Pred nástupom kozmickej geodézie bolo meranie pohybov zemského povrchu založené na pozemských metódach, z ktorých najbežnejšie boli triangulácia, trilaterácia a nivelácia. Pri týchto metódach geodeti opakovane merajú uhly, dĺžky a prevýšenia medzi množstvom bodov vytvorených na povrchu. Časovo závislé zmeny v týchto meraniach potom indikujú deformácie v zemskej kôre. Pozemské metódy poskytujú veľmi precízne merania deformácií, na druhej strane sú veľmi časovo a finančne náročné, sú obmedzené vzhľadom na merania medzi riedko sa vyskytujúcimi bodmi a neumožňujú priame meranie trojrozmerných zmien polohy.

Na rozdiel od pozemných spôsobov metódy kozmickej geodézie nevyžadujú priamu viditeľnosť medzi bodmi siete, nespoliehajú sa na dobré počasie a svetlo a tiež chyby sa s rastúcou vzdialenosťou medzi bodmi hromadia pomalšie. Tieto metódy využívajú merania na mimozemské objekty a satelity. V poslednom desaťročí sa na meranie deformačných zmien využíva hlavne GPS. GPS poskytuje veľmi presné merania všetkých troch zložiek polohových

zmien v externom referenčnom rámci, čo nie je možné ani v prípade pozemných metód ani v prípade radarovej interferometrie. InSAR však do oblasti mapovania deformácií prináša nové možnosti, ktoré nie sú dosiahnuteľné tradičnými metódami. Ide o plošné mapovanie povrchových deformácií na takmer neobmedzene veľkej ploche, mimoriadnu citlivosť na vertikálne zmeny porovnateľnú s nivelačným meraním a hlavne ako nástroj diaľkového prieskumu Zeme si nevyžaduje ľudskú prítomnosť v často nebezpečnej záujmovej oblasti a je dostupná prakticky celosvetovo [6].

Jedným z príkladov využitia diferenčnej interferometrie je štúdium zemetrasení. V prípade, že máme archivované snímky postihnutej oblasti z obdobia pred zemetrasením a následne zachytené územie po zemetrasení, je možné vytvoriť interferogram, ktorý môže slúžiť na štúdium seizmických procesov aj v tom najodľahlejšom území. Zemetrasenie v Kalifornskej púšti v roku 1992 bolo prvé zemetrasenie monitorované týmto spôsobom. Hoci veľké množstvo informácií bolo dobre zachytených pomocou konvenčného GPS, InSAR poskytla cenné informácie o javoch menšieho rozsahu v bližších aj vzdialených oblastiach od epicentra. Rovnako môže byť metóda radarovej interferometrie využitá na štúdium postseizmických deformácií, ku ktorým môže dochádzať počas niekoľkých dní až rokov po samotnom zemetrasení. Dáta získané pomocou InSAR spolu s meraniami GPS v oblastiach aktívnych zlomov môžu poskytnúť cenné informácie o hromadiacom sa napätí, čo umožní lepšie pochopenie potenciálu a rizík spojených so zemetrasením.

Ďalšou možnosťou uplatnenia interferometrie je monitorovanie vulkanickej činnosti. Na svete je viac ako 1000 aktívnych vulkánov a z toho nemalá časť sa nachádza v blízkosti husto osídlených oblastí. Vzhľadom na to, že monitorovanie vulkanickej činnosti je prostredníctvom GPS a pozemných metód takmer nemožné, je diaľkový prístup metódy ako InSAR veľmi výhodný. Družice sa pohybujú po obežných dráhach s určitou periodicitou, a preto nie je možné priebežne snímať sopečnú činnosť počas samotnej erupcie. Z toho dôvodu je interferometria skôr vhodná na dlhodobé globálne monitorovanie vulkánov, ktoré je počas erupcie doplnené seizmickým a geochemickým meraním. InSAR je vhodná na zaznamenávanie vzostupov a poklesov magmy a tiež zmien celých sopečných a geotermálnych systémov.

Poklesy zemského povrchu sú veľmi významným a globálnym problémom. Zatiaľ čo prírodné procesy zasahujú veľké územia, ide o pomalé zmeny, ľudské aktivity ako banícka činnosť naopak prebiehajú podstatne rýchlejšie a môžu spôsobiť nemalé škody na infraštruktúre a v ďalších oblastiach ľudskej činnosti. Z dôvodu predchádzania vzniku škôd je vyvíjané značné úsilie na odhalenie, monitorovanie a kontrolu poklesov. Tak, ako v ostatných prípadoch, sú

výhody radarovej interferometrie zjavné, ide o časovú a finančnú efektívnosť a dobrú dostupnosť dát. Poklesy spôsobené baníckou činnosťou boli touto metódou odhalené na mnohých miestach Európy. V súčasnosti je snaha o preskúmanie možností aplikácie tejto metódy na určenie poklesov spôsobených baníckou činnosťou v severných Čechách.

Najviac zraniteľnými oblasťami z hľadiska poklesov pôdy sú urbanistické oblasti. Našťastie však sú aj veľmi vhodné pre radarovú interferometriu z dôvodu zachovania vysokej koherencie počas dlhého časového obdobia.

Aj napriek všetkým výhodám, ktoré InSAR poskytuje, netreba zabúdať na mnohé limitácie, ktoré môžu viesť k značným chybám, nesprávnej interpretácii alebo dokonca nemožnosti použitia tejto metódy. Ide hlavne o fázový šum, ktorý je spôsobený rôznymi zdrojmi týkajúcimi sa radaru, šírenia vlnenia a odrazových vlastností povrchu, ďalej o chyby spôsobené výškou terénu ako tieň, prekrytie a zhustenie a nakoniec o chyby týkajúce sa geometrie radarového snímania.

3 Metódy a postup interferometrického spracovania

3.1 Metódy interferometrického merania

3.1.1 Tvorba DMT

Na vytvorenie interferogramu za účelom tvorby digitálneho modelu terénu je potrebné vytvoriť 2 snímky daného územia s optimálnou (nenulovou) priestorovou základňou. Kvôli zvýšeniu koherencie a tým aj kvality interferogramu je vhodné vytvoriť tieto snímky s čo najkratšou časovou základňou. Tým zabezpečíme, že nedôjde k dekorelácii spôsobenej zmenami odrazových vlastností povrchu, zmenami atmosféry a deformáciou povrchu.

Systémy navrhnuté pre mapovanie topografie povrchu sú často tvorené dvoma anténami nesenými tým istým nosičom. Hlavná anténa emituje mikrovlnné žiarenie. Žiarenie odrazené od zemského povrchu je zaznamenávane jednak anténou, ktorá vlnenie vyslala a súčasne dodatočnou anténou, ktorá je pripevnená k nosiču vo fixnej vzdialenosti. Takýto systém sa nazýva *bistatický interferometrický systém* a bežne sa používa pri SAR umiestnených na lietadlách, ako napríklad TOPSAR agentúry NASA. Topografická misia raketoplánu (SRTM), určená na presné mapovanie topografie zemského povrchu, vypusteného v januári 2000 používala dodatočnú anténu pripevnenú na 60m dlhom prídavnom ramene.

Väčšina kozmických SAR systémov však využíva satelity s jednou anténou, tzv. *monostatický interferometrický systém*. Takéto systémy musia na vytvorenie druhého SAR snímku pomerne presne po určitom čase kopírovať dráhu prvého snímkovania. Čím dlhší je časový odstup medzi oboma snímkami, tým viac chýb bude vplývať na interferogram.

Ďalším možným spôsobom sú tandemové misie družíc ako napríklad ERS-1 a ERS-2. Tieto dva satelity sa pohybovali po rovnakej obežnej dráhe a snímkovali rovnaké územie s časovým odstupom 1 deň, čo umožňovalo vytváranie topografických máp s pomerne vysokou mierou koherencie.



Obr.č. 8 – monostatický (vľavo) a bistatický (vpravo) interferometrický systém

3.1.2 Diferenčná interferometria

Aby bolo možné vytvoriť diferenčný interferogram, musí v čase medzi vytvorením prvého a druhého snímku v danom teréne dôjsť k deformácii. Použitie bistatického interferometrického systému v tomto prípade preto nie je možné, pretože snímky sú vytvorené súčasne a v teréne preto nemohlo dôjsť k žiadnej zmene. Interferometrické dáta v tomto prípade preto musia pochádzať z monostatického interferometrického systému a to buď z jednej družice, ktorá snímkuje územie v rôznom čase alebo z viacerých družíc, tiež snímkujúcich v odlišných časoch. Existuje viacero spôsobov ako vytvoriť diferenčný interferogram.

- metóda dvoch preletov (two-pass method)

1) Pomocou interferometrického páru dvoch SAR snímkov so základňou blízkou nule. V takom prípade je zmena interferometrickej fáze v interferograme ovplyvnená takmer výhradne polohovými zmenami terénu. V prípade družíc ERS by napr. v interferograme s kolmou základňou 5m generoval zmenu interferometrickej fáze 2π až výškový rozdiel 1860m. To znamená, že v území s výškovými rozdielmi niekoľko desiatok až stoviek metrov by bol ich vplyv zanedbateľný a prípadné zmeny interferometrickej fázy by boli spôsobené i len niekoľkocentimetrovými polohovými zmenami terénu [2].

2) Pomocou interferometrického páru dvoch SAR snímkov so základňou rôznou od nuly. V tomto prípade bude interferogram obsahovať deformačnú aj polohovú zložku, ktorú je potrebné pre účely diferenčnej interferometrie odstrániť. Tento spôsob využíva externý digitálny model terénu, ktorý sa za využitia známej základne natransformuje do radarového súradnicového systému a následne od interferogramu odpočíta . Pretože pre mnoho oblastí zemského povrchu sú nejaké digitálne modely dostupné, môže byť tento prístup veľmi prínosný. Nevýhodou je, že chyby DMT sa prenesú aj na výsledné deformačné posuny a ich veľkosť bude závislá na charakteristikách priestorovej základne.

- metóda troch preletov (three-pass method)

Pri tejto metóde sa využíva extra SAR snímok. Z takto vzniknutých snímkov sa vytvoria dva páry, pričom dva vedľajšie snímky majú spoločný hlavný snímok. Vhodnou kombináciou sa tak vytvorí takzvaný topografický pár. U tohto páru sa predpokladá, že neobsahuje žiadnu deformáciu, má vhodnú základňu, ktorá zaručuje citlivosť na topografiu a dostatočnú mieru koherencie. Podobným spôsobom sa vytvorí diferenčný pár, s tým rozdielom, že tento bude obsahovať deformačnú zložku. To docielime výberom snímkov s väčšou časovou základňou a menšou priestorovou základňou.

Topografický pár je následne rozbalený, natransformovaný do systému deformačného páru a nakoniec od neho odpočítaný. Výsledkom tohto procesu je diferenčný interferogram obsahujúci deformačnú zložku.

V prípade, že priestorové základne majú celočíselný podiel, rozbalenie fázy nie je potrebné a fáza topografického páru môže byť priamo prepočítaná do mierky deformačného páru a následne odpočítaná. Túto vlastnosť je dobré mať na pamäti pri výbere dát, pretože rozbalenie fázy je jednou z najkomplikovanejších častí interferometrie.

- metóda štyroch preletov(four-pass method)

Z dôvodu obmedzeného množstva dostupných snímkov pre dané územie môže nastať prípad, že pre vytvorenie interferometrického a deformačného páru nenájdeme vhodný spoločný snímok. V takomto prípade je možné využiť metódu štyroch preletov. V tomto prípade topografický a deformačný pár sú navzájom nezávislé, to znamená že, nemajú spoločný *master* snímok. Po vhodnom výbere snímkov je tento postup porovnateľný s metódou troch preletov. Jeden interferogram sa však musí prevzorkovať na druhý a to so subpixelovou presnosťou. Praktický rozdiel medzi týmito metódami spočíva vo vplyve atmosféry. U metódy troch preletov sa atmosféra prejaví na spoločnom snímku rovnako, čím sa pri ďalšom spracovaní jej vplyv čiastočne odstráni.

3.2 Postup interferometrického spracovania

Pre interferometrické spracovanie existuje niekoľko dostupných softvérov operujúcich pod rôznymi operačnými systémami. Pre praktické účely boli vyvinuté komerčné softvéry ako

napríklad ErthView®InSAR, ktoré umožňujú pomerne jednoduché ovládanie pri spracovaní dát. Na druhej strane pre výskumné účely je často výhodný softvér v licencii *public domain*, ktorý je voľne dostupný a bezplatný pre nekomerčné účely. Príkladom je program DORIS, ktorý bol použitý aj pri spracovaní tejto práce. Nevýhodou takéhoto softvéru môže byť nedostatok spoľahlivej pomoci pri inštalácii, používaní, prípadných chybách a tiež nedostatok dokumentácie. Na druhej strane komerčný softvér tiež nefunguje vždy bez problémov a pre jeho používateľa je takmer nemožné chyby opraviť, alebo zistiť ich pôvod. Hlavnou výhodou softvéru *public domain* je *open-source*, čiže dostupnosť zdrojového kódu, a teda aj možnosť jeho opravovania a prispôsobovania vzhľadom k potrebám.

Aj napriek väčšiemu množstvu interferometrických softvérov je postup krokov pri spracovaní dát približne rovnaký. V prípade tejto práce bol použitý program Doris a preto budú jednotlivé kroky demonštrované pomocou neho.

DORIS - Delft Object-oriented Radar Interferometric Software - je samostatný program, ktorý dokáže vykonávať najbežnejšie kroky interferometrického spracovania, ktoré sú rozdelené do modulov. Doris dokáže spracovávať SLC (Single Look Complex) dáta k vytvoreniu interferometrických produktov a tiež dokáže georeferencovať rozbalené interferogramy. Najvhodnejší je na spracovanie dát z ERS a ENVISAT, pretože tieto platformy sú stabilné, majú k dispozícii veľmi presné informácie o orbitách a ich dáta sú pomerne lacné. Doris je schopný čítať aj formát dát z družíc JERS a RADARSAT. Dokonca aj v prípade, že SLC dáta boli vytvorené nejakým iným SAR procesorom, je možné program Doris použiť na interferometrické spracovanie [4].

3.2.1 Výber snímkov

V prípade, že je dostupných viac SAR snímkov, výber snímkov je jedným z najdôležitejších rozhodnutí pri aplikáciách v radarovej interferometrii. Kritéria výberu závisia na tom, k čomu má daný výskum slúžiť. Hlavné rozhodnutia spočívajú vo výbere druhu použitého senzoru, zhodnotenia dostupnosti dát, výbere časovej a priestorovej základne a na charakteristikách terénu a atmosféry počas snímkovania

Výber vlnovej dĺžky použitého senzoru ovplyvní rozlíšenie a denzitu prúžkov a tiež určuje hodnotu kritickej základne. Po určení potrebnej vlnovej dĺžky je potrebné zistiť, aká je dostupnosť dát. U radarov ERS, JERS a Radarsat je možné prezrieť si archív snímkov on-line.

S prihliadnutím na dostupnosť dát je výber časovej a priestorovej základne hlavným parametrom, ktorý určuje vhodnosť snímkov pre konkrétne aplikácie. Priestorová základňa ovplyvňuje citlivosť na topografickú výšku, množstvo dekorelácie spôsobené geometriou a efektivitu rozbalenia fáze. Časová základňa by mala byť pri topografickom mapovaní čo najkratšia. U deformácii jej veľkosť závisí na tom, či deformácie sa odohrávajú postupne v čase, alebo k nim došlo nárazovo (zemetrasenie). U postupných zmien volíme základňu podľa toho, v akých časových intervaloch chceme danú zmenu monitorovať. U nárazových zmien je vhodné voliť časovú základňu tiež čo najkratšiu.

Charakteristiky povrchu sú tiež dôležité pri výbere snímkov, jedná sa o drsnosť, výškovú členitosť, druh a množstvo vegetácie a vplyv ľudskej činnosti. Tieto charakteristiky môžu vypovedať o množstve dekorelácie, ktorá sa dá očakávať.

Nakoniec je potrebné sa zamyslieť, aký je vplyv atmosféry na jednotlivé snímky. Informácie o stave atmosféry sa dajú získať z meteorologických dát.

3.2.2 Predspracovanie

Pred samotným spracovaním je nutné použité dáta skontrolovať a opraviť prípadné chyby. Originálne dáta (raw data) musia byť prepracované na SLC dáta, s ktorými dokáže pracovať Doris. Formát SLC môže byť objednaný aj priamo od ESA.

3.2.3 Koregistrácia a filtrácia

Koregistrácia *master a slave* snímku zo sub-pixelovou presnosťou je nevyhnutná pre d'alšie interferometrické spracovanie. Vzhľadom k začiatočnému a koncovému času snímkovania daného úseku môže dôjsť k pozdĺžnemu posunu až niekoľko tisíc riadkov. V priečnom smere je posun závislý na veľkosti kolmej základne a môže sa rádovo jednať o desiatky pixelov. Koregistrácia vlastne znamená natransformovanie oboch snímkov do spoločného systému. Jedná sa o natransformovanie a prevzorkovanie *slave* snímku do systému *master* snímku. Z dôvodu výpočtovej náročnosti tento proces prebieha v dvoch krokoch – hrubá a jemná koregistrácia.

- hrubá koregistrácia – pre výpočet v Dorise na to slúžia moduly COARSEORB, ktorý spočíta offset snímkov na základe známych presných dráh družíc. Následne modul COARSECORR spočíta presnejší offset pomocou hodnôt amplitúd v obrazoch. Pre tento výpočet sú potrebné parametre z predchádzajúceho kroku a výsledok je s presnosťou na niekoľko málo pixelov.

Medzi hrubou a jemnou koregistráciou sa obidve obrazy ešte filtrujú v smere azimutu, na čo slúžia moduly M_FILTAZI a S_FILTAZI.

jemná koregistrácia – pri známych hodnotách z hrubej koregistrácie môže dôjsť k jemnej koregistrácii. Pri tomto kroku sa spočíta vzájomný offset v mnohých oknách oboch snímkov s presnosťou až 0,1 pixelu. K tomuto kroku slúži modul FINE.

3.2.4 Interpolácia a prevzorkovanie

interpolácia – výsledky z kroku FINE, pri ktorom boli v mnohých oknách spočítané hodnoty *offsetu* s odlišnou spoľahlivosťou sú následne preložené polynomickou funkciou nízkeho stupňa (zadá sa). Chybové hodnoty môžu byť vylúčené manuálne úpravou potrebného súboru alebo automaticky nastavením prahovej hodnoty pre mieru korelácie.

 - prevzorkovanie – modul RESAMPLE aplikuje vypočítané hodnoty a prevzorkuje všetky pixely slave snímku na mriežku master snímku.

Po prevzorkovaní sa obrazy filtrujú v smere *range*, čím dôjde aj k orezaniu neprekrývajúcich sa častí snímkov. V Dorise to má na starosti modul FILTRANGE.

3.2.5 Tvorba interferogramu

Celkový interferogram je vytvorený komplexným násobením korešpondujúcich si pixelov v oboch snímkoch, pričom dôjde k násobeniu amplitúd a odčítaniu fáz.

$$I(i, j) = S_1(i, j) S_2(i, j)^* = |S_1| |S_2| e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)}$$
(3.1)

I(i, j) – hodnota interferogramu pixelu v i-tom riadku a j-tom stĺpci Sk(i, j) – komplexná hodnota snímku v danom pixeli

Aj keď je to hlavne fáza $\Delta \varphi = (\varphi 1 - \varphi 2)$, ktorá je dôležitá pre interferometriu, komplexná hodnota interferogramu sa zachováva pre ďalšie výpočty. V našom prípade bol tento krok uskutočnený modulom INTERFERO.

3.2.6 Odstránenie referenčnej fázy (flat-Earth phase)

Vypočítaný interferogram v sebe obsahuje aj vplyv fázy referenčného elipsoidu, ktorú je treba odstrániť. Chceme aby, sa rovinné územie (plocha elipsoidu) zobrazilo bez interferometrických prúžkov. K tomuto účelu slúžia moduly COMPREFPHA a SUBTRREFPHA. Prvý z týchto modulov spočíta hodnoty zodpovedajúcej referenčnej fázy a druhý ju následne odčíta od interferogramu. Pre výpočet referenčnej fázy je nevyhnutné poznať presné obežné dráhy. Pre zvolený pixel P sa následne spočítajú odpovedajúce súradnice x,y,z oboch satelitov a tiež odpovedajúci bod P na elipsoide. Následne sa spočíta rovnobežná základňa a referenčná fáza:

$$B_{\parallel} = d(M, P) - d(S, P)$$
 (3.2)

 B_{\parallel} - je rovnobežná základňa P – je poloha bodu P na elipsoide M, S – sú polohy satelitov

Fáza pixelu v master snímku je definovaná ako:

$$\Phi = -\frac{4\pi}{\lambda} d(M, P) \tag{3.3}$$

A referenčná fáza pre tento pixel:

$$\Phi = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel} \tag{3.4}$$

Referenčná fáza je rovnakým spôsobom spočítaná vo viacerých bodoch, ktoré sú rovnomerne rozložené po celej scéne. Tieto body sú následne preložené dvojrozmernou polynomickou funkciou, pričom sú dopočítané hodnoty referenčnej fázy pre všetky pixely. Inou možnosťou je metóda EXACT, ktorá priamo spočíta referenčnú fázu pre každý pixel. Táto fáza je následne odpočítaná od interferogramu, čo sa uskutoční komplexným násobením.

$$I = I\left(\cos R_{\Phi} - i\sin R_{\Phi}\right) \tag{3.5}$$

I – je komplexný interferogram

 R_{Φ} – je referenčná fáza v danom bode.



Obr.č. 9 – ukážka interferogramu pred (vľavo) a po (vpravo) odstránení referenčnej fázy obr. upravené z [1]

3.2.7 Výpočet koherencie

Pre odhadnutie vplyvu fázového šumu a na posúdenie použiteľnosti interferometrie pre konkrétnu oblasť slúži odhad koherencie. Výsledkom takéhoto výpočtu je mapa koherencie, ktorá v každej konkrétnej časti obrazu znázorňuje mieru korelácie medzi použitými snímkami. Hodnoty koherencie sa pohybujú v rozmedzí 0 - 1 a v koherenčnej mape sú interpretované stupňami šedi. Nule zodpovedá čierna farba a znamená, že informácia obsiahnutá vo fáze je kompletne znehodnotená šumom, naopak biela farba (hodnota 1) sa vyskytuje v častiach obrazu, kde nedošlo ku žiadnemu vplyvu fázového šumu.

V Dorise sa na výpočet používa modul COHERENCE. V tomto kroku je možné vypočítať komplexný koherenčný obraz a to buď s odstránenou, ale aj s prítomnou referenčnou fázou.

Komplexný obraz koherencie medzi dvoma obrazmi je definovaný ako:

$$\gamma_{c} = \frac{E\{M S^{*}\}}{\sqrt{E\{M M^{*}\}E\{S S^{*}\}}}$$
(3.6)

E - je stredná hodnota

 γ_c – je komplexná koherencia

M – je master snímok

S – je slave snímok (prípadne môže byť aj bez referenčnej fázy S = S R*)

Stredná hodnota E sa počíta v rámci predefinovanej oblasti pohyblivého okna. Miera (veľkosť) koherencie je definovaná ako absolútna hodnota $|\gamma_c|$ a počíta sa ako $\hat{\gamma} = |\gamma_c|$

$$\hat{\gamma} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N} M_i S_i^*}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N} M_i M_i^* \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N} S_i S_i^*}}$$
(3.7)

Informácie obsiahnuté v koherenčnej mape môžu byť okrem hodnotenia kvality využité aj na klasifikáciu povrchu. Odhadu koherencie bude v tejto práci venovaná samostatná kapitola.



Obr.č. 10 – ukážka koherenčnej mapy okolia Mt. Vesuvius, prevzaté zo stránok ESA [8]

3.2.8 Výpočet a odpočet fázy odpovedajúcej digitálnemu modelu terénu

Kroky popísané v tejto kapitole sú nevyhnutné v prípade využitia metódy dvoch preletov, kedy sa pre účely diferenciálnej interferometrie využíva extérny digitálny model terénu. K tomuto účelu slúžia kroky COMPREFDEM a SUBTREFDEM.

Pri použití prvého modulu potrebujeme mať k dispozícii externý digitálny model, ktorý je následne konvertovaný do súradnicového systému radaru a je spočítaná fáza, ktorá takémuto terénu zodpovedá. Výsledkom je obraz, ktorý vyzerá ako interferogram neovplyvnený fázovým šumom.

V kroku SUBTREFDEM sa od interferogramu odpočíta digitálny model terénu vypočítaný v predchádzajúcom kroku. Tento proces prebieha obdobne ako odstránenie referenčnej fázy popísaný v kapitole 3.2.6 vzťah (3.5).

3.2.9 Filtrácia fázy

V prípade potreby môže byť pri spracovaní spustený modul FILTPHASE, ktorý slúži na filtráciu interferogramu za účelom zníženia šumu napríklad pred vizualizáciou, alebo pre zlepšenie fázového rozbalenia. Pri tomto kroku môžu byť použité rôzne filtre ako napríklad *goldstein*, ktorý zaostrí jednotlivé prúžky tak, že pri výpočte priradí vrcholom spektrálnych prúžkov väčšiu váhu. Ďalší filter, ktorý sa dá v Dorise použiť je nazvaný *spatialconv*, ktorý pomocou konvolučnej funkcie počíta vážené priemerné hodnoty pod preddefinovaným pohyblivým oknom. Posledná metóda sa nazýva *spectral* a ide o použitie filtra, ktorý sa dá definovať vo vstupnom súbore (použitie napríklad nízkofrekvenčného filtru).

3.2.10 Rozbalenie fázy

Rozbalenie fázy je jedným z najproblematickejších krokov radarovej interferometrie a v programe Doris nie je implementované, preto je potrebné k tomuto kroku využiť napr. program SNAPHU.

Interferogram zbavený vplyvu referenčnej fázy obsahuje informáciu o relatívnej výške terénu, ktorá je však neurčitá. Všetky sú zabalené do 2π fázového cyklu. Jeden fázový cyklus potom zodpovedá výškovému cyklu q_a (viď vzťahy 2.11, 2.13). Fázový rozdiel medzi dvoma bodmi na sploštenom interferograme potom udáva skutočný výškový rozdiel plus celočíselný násobok výškových cyklov. Proces, ktorý umožňuje priradiť jednotlivým interferometrickým prúžkom správny počet výškových cyklov sa nazýva rozbalenie fázy. Existuje niekoľko techník rozbalenia fázy, avšak treba dodať, že tento proces väčšinou nemá jednoznačné riešenie a k správnemu riešeniu je nutné často použiť známe informácie z terénu. Hlavne v prípade veľmi zašumených interferogramov a dekorelovaných oblastí je rozbalenie fázy veľmi problematické a niekedy je nutné obraz rozdeliť na menšie ucelené časti s dobrou mierou koherencie a tieto časti potom spracovať samostatne.

V tejto práci sa nebude tejto problematike venovaná väčšia pozornosť, viac informácií je možné nájsť v [9], alebo [19].

3.2.11 Tvorba diferenčného interferogramu

V tejto kapitole je popísaný krok DINSAR, ktorý slúži na vytvorenie diferenčného interferogramu pri metóde 3 alebo 4 preletov (pozri 3.1.2). V tomto kroku dôjde k odstráneniu

fázy tvorenej topografiou od deformačnej a atmosférickej zložky. Preto tento modul môže okrem určovania deformačných zmien slúžiť aj k štúdiu atmosféry a to u interferogramov, u ktorých sa neočakáva žiadny deformačný posun.

K tomuto kroku je potrebné mať rozbalený topografický interferogram, tvorený topografickým párom snímkov a komplexný deformačný interferogram z deformačného páru snímkov. Tieto interferogramy musia byť zbavené vplyvu referenčnej fázy a natransformované do spoločného systému. Tie sú následne od seba odčítané, čím sa odstráni topografická zložka.

3.2.12 Georeferencovanie

Po rozbalení fázy získame výškovú mapu v súradniciach SAR systému, tú je možné následne georeferencovať napríklad na elipsoid WGS84. K tomuto procesu slúžia moduly SLANTH a GEOCODE, v týchto krokoch sa najprv spočítajú výšky v systéme radaru a následne georeferencované súradnice. Výsledkom sú zemepisná šírka a dĺžka a tiež im zodpovedajúca výška pre každý pixel obrazu.

4 Základy pravdepodobnostného modelu pre InSAR

V nasledujúcich dvoch kapitolách sa bude pracovať so štatistickými pojmami a veličinami, ktoré slúžia na popísanie správania radarových interferometrických dát. Táto kapitola bude obsahovať stručný popis týchto pojmov.

4.1 Charakteristiky náhodnej veličiny

Stredná hodnota – je očakávaná hodnota náhodnej premennej $\varphi(x)$ v mieste **x**=(x,y)

$$E\{\varphi(x)\} = \mu(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi \, p df(\varphi) dx \tag{4.1}$$

kde pdf(ϕ) je hustota pravdepodobnosti veličiny $\phi(x)$.

pdf () – (*probability density function*) – často označovaná ako φ (), použitá symbolika bola prebratá z [205] a z dôvodu jednoznačnosti bude aj naďalej používaná

Variancia (rozptyl) – udáva rozptyl pozorovaných hodnôt okolo strednej hodnoty, tiež nazývaná druhý centrálny moment

$$\sigma_{\varphi(x)}^{2} = E\{[\varphi(x) - \mu(x)]^{2}\} = \int_{-\infty}^{+\infty} (\varphi - \mu(x))^{2} p df(\varphi) dx$$
(4.2)

Kovariancia – definuje intenzitu (tesnosť) vzťahu medzi dvoma veličinami, je funkciou polohy x_1, x_2

$$C_{\varphi}(x1, x2) = E\{[\varphi(x1) - \mu(x1)][\varphi(x2) - \mu(x2)]\}$$
(4.3)

4.2 Vzťah medzi koherenciou a koreláciou

koherencia – je miera fázovej stability medzi dvoma snímkami, fázové chyby sa prejavia zníženou mierou koherencie

korelácia - je miera štatistickej podobnosti dvoch signálov
Komplexnú koherenciu medzi dvoma obrazmi môžeme definovať ako

$$\gamma_c = \frac{E\{M \ S^*\}}{\sqrt{E\{M \ M^*\}E\{S \ S^*\}}}$$
(4.4)

kde E{}- je stredná hodnota

* - je komplexné násobenie

M - je komplexný master obraz

S - je komplexný slave obraz

Koreláciu medzi dvoma obrazmi môžme definovať na základe kovariancie ako

$$\Gamma = \frac{\operatorname{cov}(M, S)}{\sqrt{\operatorname{var}(M)\operatorname{var}(S)}} = \frac{E\{M S^*\} - E\{M\}E\{S^*\}}{\sqrt{(E\{M M^*\} - E\{M\}E\{M^*\})(E\{S S^*\} - E\{S\}E\{S^*\})}}$$
(4.5)

V tomto prípade je stredná hodnota najprv odčítaná v porovnaní s výpočtom koherencie. Koherencia sa rovná korelácii iba ak $E\{M\} = E\{S\} = 0$.

4.3 Štatistická stabilita

Na uplatnenie rôznych štatistických metód je nutné vedieť, či je možné považovať skúmaný fyzikálny proces za stabilný. Túto otázku je možné zodpovedať jedine v prípade nekonečne veľkého súboru hodnôt pre daný proces. Z tohto dôvodu je potrebné na základe známych vlastností daného fyzikálneho javu prijať určité matematické predpoklady, alebo zjednodušiť podmienky stability. Za takýchto predpokladov bolo vytvorených niekoľko úrovní stability.

Úplná stabilita – stabilný proces je náhodný proces, v ktorom sa funkcia hustoty pravdepodobnosti nejakej náhodnej premennej X nemení v čase a priestore, výsledkom čoho je, že parametre ako stredná hodnota a variancia sa tiež nemenia v čase a priestore.

V praxi je väčšinou postačujúce splnenie jemnejších podmienok, ktoré sú podrobne popísané napr. v [3]. V prípade rôznych výpočtov, kde sa využíva pohyblivé okno, je postačujúca stabilita v rámci tohto okna.

Ergodicita - pre ergodický signál platí, že priestorové (prípadne časové) a výberové (myslená výberová vzorka nezávislých pozorovaní za rovnakých okolností) priemery sa rovnajú.

Napríklad výpočet odhadu koherencie za použitia pohyblivého okna sa spolieha na predpoklad ergodicity.

4.4 Vzťah medzi koherenciou a fázovým šumom

Nakoľko má koherencia popisovať kvalitu interferogramu, ktorý je tvorený fázovými rozdielmi dvoch snímkov, musí medzi koherenciou a fázovým šumom existovať funkčný vzťah. V ďalšom texte sa bude pracovať s pojmom multilooking, a preto by bolo vhodné ho na tomto mieste priblížiť.

multilooking – rozumie sa ním zhustenie informácie do rozlišovacej bunky, v našom prípade sa bude jednať o priemerovanie viacerých pixelov do jednej bunky, napríklad za účelom dosiahnutia rovnakého rozlíšenia v smere azimutu a v smere range. Výsledkom je zníženie rozlíšenia, ale aj napríklad zníženie šumu, alebo odstránenie skreslenia pri odhade koherencie. Pri označení L-pohľadov za L dosadzujeme faktor multilooku. Multilooking môže všeobecne pri iných aplikáciách znamenať, že bunka obsahuje viac informácií.

Podľa [3] môžeme vyjadriť fázový rozptyl vyplývajúci z $\gamma < 1$ ako :

$$\sigma_{\Phi}^{2} = \int_{-\pi}^{+\pi} [\Phi - E\{\Phi\}]^{2} p df(\Phi) d\Phi$$
(4.6)

kde Φ- je interferometrická fáza

pdf - je hustota pravdepodobnosti pre interferometrickú fázu

Pre jedno-pohľadové (L=1) dáta môže byť fázový rozptyl vyjadrený pomocou koherencie γ ako :

$$\sigma_{\Phi,L=1}^{2} = E\{[\Phi - E\{\Phi\}]^{2}\} = \frac{\pi^{2}}{3} - \pi \arcsin(|\gamma|) + \arcsin^{2}(|\gamma|) - \frac{Li_{2}(|\gamma|)^{2}}{2} \qquad [3](4.7)$$

kde $E{\Phi} = \Phi_0$ - je očakávaná hodnota fáze interferogramu, čo je vlastne fáza komplexnej korelácie

Li₂ - je Eulerov dilogaritmus definovaný ako :

$$Li_{2}(|\gamma|)^{2} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{|\gamma|^{2k}}{k^{2}}$$
(4.8)

. .



Obr.č. 11 – Vzťah medzi koherenciou a fázovým šumom [3]

4.5 Vzťah medzi koherenciou a SNR

SNR (signal to noise ratio) – je pomer signálu a šumu, SNR = $\frac{S}{N}$

Absolútnu hodnotu koherencie $|\gamma|$, ktorá sa pohybuje v rozmedzí 0 – 1 môžeme vyjadriť ako funkciu pomeru signálu a šumu SNR:



Obr.č. 12 - Vzťah medzi koherenciou a SNR v závislosti na veľkosti okna 1-100

5 Zdroje dekorelácie a fázového šumu

Miera kvality generovaného digitálneho modelu terénu a deformačných posunov je kvalite interferogramu, z ktorého vznikli. Počas procesu snímkovania závislá na a interferometrického spracovania dochádza k hromadeniu chýb, ktoré zhoršujú kvalitu, prípadne znemožňujú tvorbu výsledných produktov. Jedná sa o chyby spôsobené odrazom, geometriou, charakteristikami radaru, dráhou a spracovaním. Výsledkom týchto vplyvov je dekorelácia, ktorú môžeme definovať ako šum vzniknutý pôsobením chýb. Niektoré z týchto chýb sú neodlúčiteľné od radaru a interferometrie a dajú sa minimalizovať vhodným výberom a spracovaním dát, iné je možné redukovať zlepšením samotného systému, nikdy však nebude možné úplne odstrániť všetky zdroje dekorelácie. Pochopenie pôvodu a charakteru jednotlivých chýb je nevyhnutné pre ich minimalizáciu, vhodný výber dát a posúdenie kvality výstupov. Táto kapitola sa bude zaoberať práve analýzou zdrojov dekorelácie.

Kategória	Charakter	Тур	Pôvod	
Fázové	Náhodné širokopásmové,	Tepelný šum	Radarový systém	
chyby	charakterizované	Šum spôsobený		
	interferometrickou	kvantovaním		
	koreláciou	Nejednoznačnosť celočíselného		
	násobku fázových cyklov			
		Základňová dekorelácia	Korelácia	
		Volumetrická dekorelácia	elmag. poľa	
	Časová dekorelácia			
		Chyby registrácie	Procesor	
		Početný šum		
	Systematické, pomaly	Nestabilita prijímanej	Radarový	
	premenlivé	fázy	systém	
		Atmosféra	dráha signálu	
		Ionosféra		
	Závislé na dátach,	Chyby rozbalenia fázy	Spracovanie	
	systematické a náhodné	Chyby spôsobené DMT	Doplnkové	
			spracovanie	
Metrologické	Obecne systematické,	Chyba základne	Neurčitosť	
chyby	môžu	Chyba polohy nosiča	geometrie	
	byť náhodné v prípade	Chyba vo vzdialenosti	systému	
	nepravidelného a			
	nekompenzovaného			
	pohybu nosiča			
Chýbajúce	Závislé na teréne	Prekrytie	distorzia obrazu	
dáta		Tieň		

Tab.č. 1 – Chyby merania a	spracovania InSAR	podľa [6]
----------------------------	-------------------	-----------

5.1 Fázové chyby

Podľa [3] môžeme vyjadriť celkovú koherenciu v závislosti na jednotlivých dekorelačných faktoroch ako:

$$\gamma_{\text{tot}} = \gamma_{\text{geom}} \gamma_{\text{DC}} \gamma_{\text{vol}} \gamma_{\text{thermal}} \gamma_{\text{temporal}} \gamma_{\text{processing}}$$
(5.1)

 γ_{tot} – celková koherencia

 γ_{geom} – geometrická dekorelácia, , spôsobená rozdielnym uhlom pohľadu

 γ_{DC} – dekorelácia spôsobená Dopplerovým centroidom

 $\gamma_{vol}\,$ - dekorelácia spôsobená preniknutím radarovej vlny do vegetácie, alebo povrchu

 $\gamma_{thermal}$ – tepelný alebo systémový šum, spôsobený charakteristikami systému

γ_{temporal} - časová dekorelácia, spôsobená zmenami povrchu

 $\gamma_{\text{processing}}$ - dekorelácia spôsobená spracovaním

Porovnaním rovnice 5.1 a tabuľky 1, zistíme že rovnica obsahuje menej faktorov a to preto, že vplyv niektorých chýb je zanedbateľný. Rovnica preto zachytáva len významné zdroje dekorelácie. Taktiež vplyv chýb orbít a atmosféry nie je v rovnici 5.1 zachytený a bude popísaný samostatne.

5.1.1 Zanedbateľné chyby

Šum spôsobený kvantovaním vzniká pri digitalizácii prijatého signálu. Digitalizáciou sa kvantifikujú hodnoty prijatého signálu. Zaokrúhľovaním týchto hodnôt na určitý počet platných cifier sa do zaznamenaných dát zavádza náhodná chyba, ktorá môže skutočnú hodnotu signálu zosilniť, alebo oslabiť. Spravidla radary obsahujú dostatočný počet bitov, čím sa udržuje táto chyba na prijateľne nízkej úrovni.

Početný šum – k vzniku tejto chyby dochádza pri spracovaní z dôvodu, že počítače pri výpočte používajú konečný počet platných cifier. Táto chyba je väčšinou veľmi malá, a preto zanedbateľná.

5.1.2 Tepelná dekorelácia

Tepelný šum vzniká z dôvodu, že radar operuje pri nenulovej teplote a pozoruje teplé objekty, ktoré vyvolávajú tepelný pohyb elektrónov v radarovom systéme. Dekorelácia spôsobená tepelným šumom môže byť minimalizovaná zosilnením vyslaného signálu [6].

V rovnici (5.1) sa pod γ_{thermal} rozumie celkový šum spôsobený charakteristikami systému, ktorého vplyv na interferometrickú fázu môžeme vyjadriť pomocou SNR pre konkrétny systém [18], alebo pre 2 odlišné senzory ako:

$$\gamma_{thermal} = \frac{1}{1 + SNR^{-1}} = \frac{1}{\sqrt{(1 + SNR_1^{-1})(1 + SNR_2^{-1})}}$$
(5.2)

SNR môžeme vyjadriť ako: $SNR = \overline{Pr}/Pn$ (5.3) kde Pn je sila tepelného šumu prijímača:

$$Pn = kT_{sys}B_R \tag{5.4}$$

k – Boltzmanova konštanta T_{sys} – teplota prijímača B_R – vlnový rozsah systému

a $\overline{P}r$ je priemerná sila prijímaného signálu:

$$\overline{P}r = \frac{P_t}{4\pi R^2} GA_{scat} \sigma^0 \frac{A}{4\pi R^2}$$
(5.5)

Pt- prenášaná energia

- R-vzdialenosť medzi anténou a rozlišovacou bunkou $R{=}h{/}cos~\theta_{inc}$
- h výška satelitu

 $\theta_{inc}-uhol \; pohľadu\; (incidenčný uhol)$

- G prírastok zo smeru G = $4\pi A/\lambda^2$
- $A plocha antény A = L_a x D_a$
- $\lambda vlnová dĺžka radaru$

 A_{scat} – plocha odrazu

 σ^0 – normalizovaný účinný prierez radaru (radar cross section), závisí na vlnovej dĺžke a uhle pohľadu

kde A_{scat} je definovaná ako veľkosť plochy ožiarenej signálom [3]

$$A_{scat} = \frac{\lambda R}{L_a} \frac{c\tau}{2\sin\theta_{inc}}$$
(5.6)

L_a – dĺžka antény

 $\tau - d$ ĺžka pulzu

c - rýchlosť svetla

5.1.3 Geometrická dekorelácia

V prípade, že bod obrazu je pozorovaný pod mierne odlišnými uhlami , príspevok od jednotlivých odrážačov v rámci pixelu bude odlišný, čo spôsobí rozdiel aj v celkovej hodnote pixelu. Z geometrického hľadiska sa vzdialenosti medzi radarom a jednotlivými odrážačmi pri dvoch rôznych pohľadoch mierne líšia. Náhodne usporiadané odrážače v oboch prípadoch potom vytvoria náhodne odlišný signál. To spôsobí pokles korelácie , ktorá je nepriamo úmerná rastúcej základni. Tento pokles nazývame geometrická, alebo základňová dekorelácia. Hustota topografických prúžkov je úmerná kolmej zložke základne. V prípade, že z dôvodu príliš veľkej základne, strmého svahu terénu, alebo diferenčného pohybu terénu, dôjde v rámci elementu k fázovému posunu 2π a viac, interferometrický signál sa úplne dekoreluje, čo znemožní tvorbu interferogramu.

Na základe toho môžeme definovať kritickú hodnotu kolmej základne $B_{\perp,crit}$. Ide o základňu, ktorá spôsobí spektrálny posun rovný šírke použitého pásma B_R [3].

$$B_{\perp,crit} = \lambda(B_R/c)R_1 \tan(\theta_{inc} - \varsigma)$$
(5.7)

B_{⊥,crit} – kritická kolmá základňa (pre ERS je to v rovinnom teréne 1,1 km)

 ζ – topografický sklon svahu

 $\theta_{inc}-uhol \; pohľadu$

Geometrickú dekoreláciu môžeme následne podľa [3] definovať ako:

$$\left|\gamma_{geom}\right| = \begin{cases} \frac{B_{\perp,crit} - B_{\perp}}{B_{\perp,crit}}, \left|B_{\perp}\right| \le B_{\perp,crit} \\ 0, \qquad \left|B_{\perp}\right| > B_{\perp,crit} \end{cases}$$
(5.8)



Obr.č. 13 – Vzťah medzi kolmou základňou a geometrickou dekoreláciou v závislosti na sklone terénu.

5.1.4 Dekorelácia spôsobená Dopplerovím centroidom

Na zvýšenie rozlíšenia v smere azimutu sa využíva Dopplerov princíp. Tento spôsob umožňuje zvýšiť presnosť využitím iba úzkeho pásu frekvencií odrazeného žiarenia. Rozdiel medzi frekvenciami Doplerovského centroidu (stredmi Dopplerovských frekvencií) Δf_{DC} medzi oboma zábermi spôsobí dekoreláciu, ktorá je azimutálnou obdobou geometrickej dekorelácie. Medzi dekorelačným faktorom γ_{DC} a Δf_{DC} potom existuje lineárny vzťah, ktorý môžme podľa [3] vyjadriť ako:

$$\left|\gamma_{DC}\right| = \begin{cases} 1 - \Delta f_{DC} / B_A, \left|\Delta f_{DC}\right| \le B_A \\ 0, \left|\Delta f_{DC}\right| > B_A \end{cases}$$
(5.9)

B_A – šírka pásma v smere azimutu

V prípade SAR nesených družicami ERS je tento efekt minimálny. Pri interferogramoch vzniknutých kombináciou z ERS-1 a ERS-2 a tiež interferogramoch zo snímkov ERS-2 vytvorených po poruche gyroskopu však tento vplyv môže byť podstatný. Kvalitu takto poškodených interferogramov je potom možné výrazne vylepšiť azimutálnym filtrovaním.

5.1.5 Časová dekorelácia

Akákoľvek zmena polohy, alebo elektrických vlastností jednotlivých odrážačov v rámci rozlišovacej bunky v čase medzi jednotlivými snímkami spôsobí časovú dekoreláciu. Táto zmena môže byť spôsobená rôznymi vplyvmi, ako sú rast vegetácie, pohyb terénu, erózia, kultivácia, stavebná činnosť a iné. Časová dekorelácia je preto silne závislá na skúmanom teréne, z toho dôvodu voľba časovej základne záleží na konkrétnej aplikácii interferometrie. K dekorelácii vodných plôch dochádza v rozmedzí milisekúnd až sekúnd, u vegetačného porastu je zmena tiež veľmi rýchla, naopak povrchy pokryté drobnými kameňmi ako sú púšte, nezarastené vulkány a tiež zastavané plochy môžu vykazovať vysokú koherenciu aj niekoľko rokov.

Časovú dekoreláciu výrazne ovplyvňuje aj použité vlnové pásmo. Napríklad 5,6cm Cpásmo je vysoko citlivé k zmenám a dekoreluje pomerne rýchlo aj v slabo zarastených oblastiach, naopak 24cm L-pásmo dokáže preniknúť vegetáciou a je preto menej citlivé na vegetačný rast, výsledkom čoho je pomalšia dekorelácia. Toto pásmo je vhodnejšie v zalesnených oblastiach, naopak výhodou pásma C je, že v menej zarastených miestach dokáže mapovať povrch podrobnejšie.

Na použitom vlnovom pásme a tiež odrazových vlastnostiach povrchu výrazne závisí aj γ_{vol} , čo je dekorelácia spôsobená preniknutím radarovej vlny do vegetácie, alebo povrchu.

Vplyv časovej dekorelácie zachytáva $\gamma_{temporal}$, analyticky vyčísliť jej vplyv by však z dôvodu veľkého množstva nepredvídateľných faktorov bolo veľmi problematické. Napríklad antropogénne zmeny spôsobené poľnohospodárstvom alebo stavebnou činnosťou nemôžu byť modelované kvantitatívne z dôvodu ich nepredvídateľnej a diskrétnej povahy. Taktiež špecifické poveternostné podmienky môžu spôsobiť nepredvídateľné zmeny povrchu. Na druhej strane, dodatočná kvantitatívna analýza časovej dekorelácie môže slúžiť na klasifikačné účely. Ak majú byť takto dosiahnuté výsledky zmysluplné, je potrebné najprv osobitne vyčísliť vplyv ostatných dekorelačných vplyvov.

5.1.6 Dekorelácia spôsobená spracovaním

Pri jednotlivých krokoch interferometrického spracovania dochádza k hromadeniu chýb, ktoré sú reprezentované celkovým dekorelačným faktorom spracovania $\gamma_{\text{processing}}$. Výsledná hodnota tohoto faktoru je tvorená súčinom dielčích faktorov jednotlivých krokov, ktoré budú následne popísané.

Chyby koregistrácie a prevzorkovania

Pri procese koregistrácie (3.2.3, 3.2.4) vzniká náhodný šum, pretože čiastočne nezodpovedajúce si signály susedných pixelov sú pri tvorbe interferogramu zmiešané dohromady. V prípade, že sú orbity známe s vysokou presnosťou (1/20 pixelu), je táto chyba zanedbateľná. Pri prevzorkovaní je najprv zo vzorkovaného obrazu pomocou interpolačného kernelu vytvorený kontinuálny signál, ktorý je následne prevzorkovaný na novú mriežku. Chyby vzniknuté pri interpolácii závisia na koherencii a na druhu použitého kernelu. Viac informácií je možné nájsť napr. v [3]. Ako už bolo vyššie napísané, chyby v zarovnaní spôsobia stratu koherencie a tým aj fázový šum. V prípade posunu o celú rozlišovaciu bunku dôjde k úplnej dekorelácii a to preto, že v takomto prípade neexistuje žiadna fyzická súvislosť medzi zodpovedajúcimi si pixelmi. Z tohto dôvodu je subpixelová presnosť nevyhnutná [3]. Relatívny posun μ_r ako zlomok rozlíšenia v range Δr vytvorí koherenciu $\gamma_{coreg,r}$ (platí aj pre koherenciu v smere azimutu) :



Obr.č. 14 – Vzťah medzi chybou koregistrácie, koherenciou a strednou chybou fázy [3].

Na obr. č. 14 je viditeľné, že po prekročení koregistračnej presnosti 0.1 rozlišovacej bunky sa koherencia výrazne nemení . Pre túto hranicu môžeme spočítať $|\gamma_{coreg,r}| = 0.98$. Pre celkový dekorelačný faktor $|\gamma_{coreg}|$ pri koregistrácii lepšej ako 0.1 potom bude platiť [3]:

$$\left|\gamma_{coreg}\right| = \left|\gamma_{coreg,r}\right| \left|\gamma_{coreg,a}\right| = 0.98^2 = 0.96$$
(5.11)

 $\gamma_{coreg,r}$ - miera koherencie v smere *range*. $\gamma_{coreg,a}$ - miera koherencie v smere *azimutu*.

Chyby rozbalenia fázy

Existujú rôzne metódy rozbalenia fázy, z ktorých každá má vlastné charakteristiky šumu, závislé na spracovaných dátach. Niektoré metódy môžu vytvoriť fázové chyby o celočíselných násobkoch 2π , iné môžu vytvárať menšie chyby spôsobené fázovými anomáliami. Predpovedať polohu týchto chýb v menej kvalitných dátach bez znalosti topografie je veľmi ťažké. V takomto prípade môže pomôcť analýza väčšieho množstva dvojíc, vytvorených v odlišných časoch a pod mierne odlišnými uhlami [6]. Problematika rozbalenia fázy je veľmi rozsiahla a v tejto práci jej nebude venovaná väčšia pozornosť, viac informácií je možné nájsť napr. v [1], [9].

Chyba DMT

Pri deformačných aplikáciách interferometrie, DMT použitý na odstránenie topografickej zložky interferogramu môže byť zdrojom chýb. Nezáleží na tom či bol DMT vytvorený interferometricky, alebo pochádza z iného zdroja, chyby v ňom obsiahnuté sa prejavia ako chyby v deformačnej mape. Výšková chyba Δ h spôsobí fázovú chybu v cykle prúžkov Δ h/h_a, z ktorej následne môžeme vyvodiť deformačnú chybu [6].

5.1.7 Vplyv atmosféry

Ako ukazujú doterajšie výsledky, prechod rádiovej vlny atmosférou spôsobuje významné zmeny v pozorovanom signáli, čo vytvorí chyby v topografii, alebo v deformáciách. Pri systémoch s dvoma anténami merajúcimi topografiu ako napr. STRM, chyba spôsobená atmosférou je u oboch snímkov skoro rovnaká a vo väčšine prípadov môže byť zanedbaná. Pri interferometrii s opakovaným preletom, atmosféra ako zdroj šumu však môže byť limitujúcim faktorom. Obzvlášť veľké chyby môže spôsobiť voda v troposfére. Zmena vlhkosti 20% môže spôsobiť fázovú chybu zodpovedajúcu 10cm deformačnej chybe, alebo topografickej chybe až 100m [6].

Je jasné, že k vytvoreniu veľmi presných meraní povrchu, alebo deformácií, je nevyhnutná znalosť stavu atmosféry v dobe snímkovania. Minimalizovať vplyv atmosféry je možné vylúčením snímkov s výrazným atmosférickým príspevkom, alebo spriemerovaním veľkého množstva interferogramov pričom dôjde k zrušeniu jednotlivých vplyvov. Pri topografických aplikáciach je vhodné maximalizovať kolmú základňu, čím sa atmosférický vplyv minimalizuje. Existuje viacero spôsobov odstránenia príspevku atmosféry na základe jej známych charakteristík, jeden z nich predstavili napr. autori článku [10].



Obr.č. 14 – Systematická zmena v smere range spôsobená fázovým oneskorením z dôvodu odlišného stavu atmosféry nad polostrovom Izu, Japonsko. Pri snímaní prvého obrazu na náveternej strane pohoria pršalo, čo spôsobilo výrazný fázový posun, zatiaľ čo na opačnej strane došlo len k malej zmene. Takýto príspevok atmosféry môže byť ľahko nesprávne interpretovaný ako deformácia. [6]

5.2 Metrologické chyby

Pre topografické aplikácie a pre odstránenie topografie z deformačného interferogramu je nevyhnutné poznať geometriu interferometrického trojuholníka tvoreného základňou a dvoma šikmými smermi s dostatočnou presnosťou. Letecké interferometrické systémy a tiež bistatické interferometrické systémy ako SRTM sú konštruované tak, aby tieto požiadavky splňovali. U metód s opakovaným preletom je chyba základne závislá na presnosti určenia orbít. Z takéhoto pohľadu je dôležitejšia relatívna presnosť polohového vektoru v čase snímkovania, ako absolútna presnosť polohy družíc. Ak orbity nie sú známe s dostatočnou presnosťou, na určenie základne sa často využívajú pozemné kontrolné body. Výsledná presnosť základne je potom funkciou presnosti pozemných kontrolných bodov [6]. Podrobnejšie sa chybami dráh družíc zaoberá diplomová práca Ing. Ivany Čapkovej [5], viac informácii na túto tému je tiež možné nájsť napr. v [3].

6 Hodnotenie kvality interferogramu

6.1 Kvalitatívne hodnotenie interferogramu

Ako bolo ukázané v predchádzajúcich kapitolách, na kvalitu interferogramu vplýva veľké množstvo dekorelačných faktorov. Pre posúdenie týchto vplyvov a kvalitatívne vyhodnotenie interferogramu sa používa odhad koherencie. V kapitole 4.4 bolo ukázané, že medzi koherenciou a fázovým šumom existuje priamy vzťah, a preto sa dokonale hodí na posúdenie správnosti interferometrickej fázy. Ako bude v nasledujúcich kapitolách naznačené, odhad koherencie je vždy nejako skreslený. Z tohto dôvodu existuje viacero prístupov k jej výpočtu, ktorých použitie závisí na účele využitia získaného odhadu koherencie. Tá môže okrem hodnotenia kvality slúžiť aj napr. na klasifikáciu typov povrchu. Nasledujúci text bude obsahovať popis rôznych metód, z ktorých niektoré budú na záver doplnené konkrétnymi číslami a porovnané.

6.1.1 Koeficient koherencie a jeho vlastnosti

Koeficient koherencie bol predstavený Norbertom Wienerom v roku 1930. Jedná sa o veľmi dôležitý pojem s množstvom užitočných aplikácií.

Nech x(t) a y(t) sú stabilné náhodné procesy (pozri 4.3), s obormi hodnôt variancií $f_{xx}(\omega)$, $f_{yy}(\omega)$ a oborom hodnôt kovariancie $f_{xy}(\omega)$, koeficient koherencie potom môžeme definovať ako :

$$\gamma_{xy}(\alpha) = \begin{cases} \frac{\left| f_{xy}(\omega) \right|}{\sqrt{f_{xx}(\omega)f_{yy}(\omega)}}, & f_{xx}(\omega)f_{yy}(\omega) > 0\\ 0, & f_{xx}(\omega)f_{yy}(\omega) = 0 \end{cases}$$
(6.1)

Zo Schwartzovej nerovnosti vyplýva že $0 : \gamma_{xy}(a) : 1$.

Existujú tri dôležité vlastnosti koeficientu koherencie [12]:

Nemennosť pri lineárnom filtrovaní:

Ak a(t) a b(t) sú odozvy dvoch lineárnych a časovo nemenných filtrov so zodpovedajúcimi prenosovými funkciami A(ω), B(ω) a $u = a^*x$, v = b*y sú filtrované verzie pôvodných procesov, pričom A(ω), B(ω) \neq 0, potom platí :

$$\gamma_{\rm uv}(\omega) = \gamma_{\rm xy}(\omega) \tag{6.2}$$

Inak povedané, koherencia medzi dvoma náhodnými procesmi nie je ovplyvnená lineárnym filtrovaním. Ďalej však platí, že táto vlastnosť nie je splnená pri odhadoch koeficientu koherencie, pokiaľ filter nesplňuje ďalšie priestorové podmienky. Odhad koeficientu koherencie si preto vyžaduje mimoriadnu opatrnosť [12].

Vzťah k predpokladanej chybe:

Ak a_0 je filter minimalizujúci strednú hodnotu štvorca predpokladanej chyby $\langle (y-a^*x)^2 \rangle$ a ak $\varepsilon = y-a_0^*x$ je skutočná chyba, obor hodnôt chyby je:

$$f_{\varepsilon\varepsilon}(\omega) = [1 - \gamma_{xy}(\omega)^2] f_{yy}(\omega)$$
(6.3)

Táto hodnota je malá, ak sa $\gamma_{xy}(\omega)^2$ blíži k 1. V takomto prípade môžeme veľmi dobre predpovedať hodnoty *y* použitím dát procesu *x*. Na druhej strane, ak $\gamma_{xy}(\omega)^2$ je blízka 0, hodnoty chýb sú porovnateľné s hodnotami dát *x* a *y*, čo znemožňuje akúkoľvek predpovedateľnosť hodnôt *y*. Podľa toho potom môžeme považovať dva procesy ako koherentné v prípade, že $\gamma_{xy}(a) \approx 1$. Ak $\gamma_{xy}(a) \approx 0$, môžeme ich potom označiť ako nekoherentné [12].

Vzťah k SNR :

Nech $x = s+n_1$ a $y = s+n_2$ sú náhodné procesy tvorené vzájomne nekorelovaným signálom a šumom *s*, n_1 , n_2 . Ak S(ω), N₁(ω), N₂(ω), sú príslušné obory hodnôt, potom :

$$\gamma_{xy}(\omega) = \left\{ \left[1 + \frac{N_1(\omega)}{S(\omega)} \right] \left[1 + \frac{N_2(\omega)}{S(\omega)} \right] \right\}^{-1/2}$$
(6.4)

a ak sa $N_1(\omega) = N_2(\omega) = N(\omega)$, potom :

$$\frac{S(\omega)}{N(\omega)} = \frac{\gamma_{xy}(\alpha)}{1 - \gamma_{xy}(\omega)}$$
(6.5)

V mnohých aplikáciách je práve SNR hlavným cieľom, a preto je rovnica (6.5) často využívaná. Aj keď pre odhad SNR nie je najvhodnejšie jednoducho nahradiť $\gamma_{xy}(\alpha)$. Vhodnejšie je použitie odhadu maximálnej pravdepodobnosti (maximum likelyhood) [12]. (pozri tiež 4.5)

6.1.2 Výberová koherencia

Komplexnú koherenciu medzi dvoma komplexnými náhodnými procesmi z_1 , z_2 s nulovou strednou hodnotou môžme definovať ako korelačný koeficient [13].

$$\Delta = \frac{E(z_1 z_2^*)}{\sqrt{E(|z_1|^2)}\sqrt{E(|z_2|^2)}}$$
(6.7)

E(x) – je očakávaná (stredná) hodnota

 Δ – je skutočná (komplexná) koherencia, často sa používa aj γ

Pre veľkosť skutočnej koherencie (alebo stupeň skutočnej koherencie) D platí D = $|\Delta|$.

Za predpokladu, že proces popísaný v (6.7) je ergodický (pozri 4.3), ako odhad koherencie môžeme použiť výberovú koherenciu $\delta = \hat{\Delta}$. V prípade L nezávislých meraní, je možné pre výberovú koherenciu δ napísať:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^{L} z_{1i} \, z_{2i} *}{\sqrt{\sum_{i=1}^{L} |z_{1i}|^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{L} |z_{2i}|^2}}$$
[13] (6.8)

i – je poradové číslo vzorku

Pre výberový odhad stupňa koherencie $d = \hat{D}$ môže byť odvodený vzťah $d = |\delta|$. Aby platil vyššie uvedený vzťah musia byť procesy z₁, z₂ stabilné a to isté musí platiť aj pre ich súčin z₁z₂*. V prípade, že je splnený aj predpoklad ergodicity, môžeme nahradiť priemer výberovej vzorky priestorovým priemerom hodnôt v záujmovej oblasti.

Charakteristiky výberovej koherencie:

Veľkosť výberovej koherencie d je odhad (založený na maximálnej pravdepodobnosti) skutočnej veľkosti koherencie D. Touzi a Lopes (1996) ukázali, že funkcia hustoty pravdepodobnosti môže byť vyjadrená ako funkcia skutočnej veľkosti koherencie D, počtu nezávislých vzoriek (prípadne počet pohľadov pri multilookingu) L>2 a hypergeometrickej funkcie F :

$$pdf(d, D, L) = 2(L-1)(1-D^{2})^{L} d(1-d^{2})^{L-2} \times F(L, L; 1; D^{2}d^{2})$$
(6.9)

pdf - je hustota pravdepodobnosti

Pre strednú (očakávanú) hodnotu E(d) platí :

$$E(d) = \frac{\Gamma(L)\Gamma(1+1/2)}{\Gamma(1+1/2)} \times {}_{3}F_{2}(3/2, L, L; L+1/2; 1; D^{2}) \times (1-D^{2})^{L}$$
(6.10)

 Γ (L) – je gamma funkcia [3]

Z rovnice 6.9 je odvodený aj vzťah pre varianciu , pre ktorú platí $var(d) = E(d^2) - E(d)^2 a$ z toho potom :





Bodkovaná čiara v ľavom obrázku je hranica Cramér-Rao, čo je spodná hranica variancie pri neskreslenom odhade koherencie a dá sa vyjadriť ako :

$$\operatorname{var}_{CR} = \frac{\left(1 - D^2\right)^2}{2L} \le \operatorname{var}(d) \tag{6.12}$$

Ako je dobre viditeľné z obr. 15, veľkosť výberovej koherencie je skreslená smerom k vyšším hodnotám a to hlavne v oblastiach s nízkou koherenciou. K zníženiu skreslenia dochádza zvýšením počtu nezávislých vzoriek (pohľadov) L a to preto, že tento odhad je asymptoticky neskreslený. Na ľavom obrázku je vidieť, že smerodatná odchýlka je totožná s hranicou Cramér-Rao, až kým odhad koherencie nezačne ovplyvňovať skreslenie. Pri skreslení vykazuje smerodatná odchýlka výpočtu koherencie nižšie hodnoty.

Neskreslený odhad výberovej koherencie:

Autori článku [13] ukázali, že neexistuje žiadny neskreslený odhad G(d), ktorý by bol funkciou veľkosti výberovej koherencie d. Ich myšlienkový postup je naznačený v nasledujúcom texte.

Ak G(d) je neskreslené, potom E[G(d)] = D. Pri použití (6.9) je možné sériou úprav ukázať, že podmienky neskreslenia sa dajú vyjadriť ako:

$$\frac{2(L-1)}{\Gamma(L)^2} \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{\Gamma(L+k)^2}{\Gamma(1+k)^2} A(k) D^{2k} = D(1-D^2)^{-L} = \sum_{j=0}^{+\infty} \frac{\Gamma(L+j)}{\Gamma(L)\Gamma(1+j)} D^{2j+1}$$
(6.13)

kde $A(k) = \int_{0}^{1} G(u)u^{2k+1}(1-u^2)^{L-2} du$ (6.14)

Toto vedie k mocninovému radu D, ktorý je treba vyriešiť pre každé D z rozmedzia 0-1. Tento problém nemá riešenie, pretože G(d) nezávisí na D a to z dôvodu, že mocninový rad na ľavej strane rovnice (6.13), ktorý zahŕňa tiež neznáme A(k), obsahuje iba párne mocniny D, zatiaľ čo mocninový rad na pravej strane pozostáva z nepárnych mocnín D [13].V článku [13] je možné nájsť dôkaz o tom, že obdobný vzťah nemá riešenie ani pre d².

Odstránenie skreslenia a intervaly spoľahlivosti:

Použitím vzťahu $d = |\delta|$ získame odhad veľkosti koherencie d_N v oblasti obsahujúcej N nezávislých vzoriek. Snahou je získať hodnotu d_N, ktorá by bola neskresleným odhadom stupňa koherencie D a spočítať jej presnosť.

Pri veľkom počte N nezávislých vzoriek je rozptyl *d* malý a rozdelenie pravdepodobnosti pre d = d_N je úzko sústredené okolo E(d) : $d_N \approx E(d)$. Vzhľadom na to, že E(d) súvisí s veľkosťou skutočnej koherencie D, neskreslený odhad je možné získať invertovaním funkcie (6.10), za vyššie zmieneného predpokladu, že $d_N = E(d)$

$$\hat{D} = Funkc^{-1}(E(d)) = d_N \tag{6.15}$$

kde Funkc je (6.10)

V prípade, že N nie je dostatočne veľké, rozptyl odhadu môže byť značný a $d_N \neq E(d)$. Vyššie popísaná metóda preto nemôže byť aplikovaná. Autori [13] uvádzajú spôsob odstránenia skreslenia výberovej koherencie d využitím (6.9). Za predpokladu, že apriórna pravdepodobnosť výskytu D je nemenná, aposteriórny odhad D pri známom d_N je možné získať maximalizovaním funkcie aposteriórnej hustoty pravdepodobnosti:

$$h(D|d_N) = \frac{pdf}{\int_0^1 pdf \, dD}$$
(6.16)

Kde pdf je zo (4). Najpravdepodobnejší odhad veľkosti skutočnej koherencie \hat{D} je potom taká hodnota D, pre ktorú h(D d_N) je maximálne. Rovnica (6.16) potom môže byť integrovaná za účelom získania intervalu spoľahlivosti pre hladinu významnosti P(a,b), kde P(a,b) je aposteriórna pravdepodobnosť, že D leží v intervale $[\hat{D} - a, \hat{D} + b]$.

6.1.3 Odhad koherencie v štatisticky nestabilných oblastiach

Odhad koherencie popísaný v predchádzajúcej kapitole popisuje štatisticky stabilné procesy. V nestabilných oblastiach môže byť stredná hodnota procesov z_1, z_2 nestabilná a odhad výberovej koherencie vedie k nesprávnej hodnote. V skutočnosti podmienka stability strednej hodnoty (predpoklad, že sa stredná hodnota E(x) nemení) môže byť zjednodušená. Stačí, aby sa

E(x) výrazne nemenilo v rámci pozorovaného intervalu [12]. V prípade, že je táto podmienka splnená u všetkých procesov zahrnutých v (6.7), nestabilné procesy môžu byť považované za lokálne stabilné (stabilné v prírastkoch) a koherencia môže byť vypočítaná pomocou "stabilného" pohyblivého okna [13]. Nižšie popísané metódy sa dajú rovnako dobre použiť aj pre stabilné oblasti.

Priemerná (komplexná) koherencia:

Priemerná (komplexná) koherencia môže byť vypočítaná priestorovým priemerovaním koherenčného vzorku vypočítaného pomocou pohyblivého okna, v rámci ktorého je daný proces považovaný za lokálne stabilný. Odhad priemernej koherencie $\hat{\Delta}$ je vyjadrený ako [13]:

$$\overline{\hat{\Delta}} = \overline{\delta}_L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_L^i$$
(6.17)

L - je počet pohľadov obsiahnutých vo vzorku

 δ_L^i - je odhad koherencie (6.8) v priestorovej polohe i

N – je počet L-pohľadových koherenčných vzoriek v záujmovej oblasti

Pre veľkosť priemernej (komplexnej) koherencie potom môžeme napísať $\left|\overline{\delta}_{L}\right| = \left|\hat{\Delta}\right|$.

Očakávaná stredná hodnota pre $\overline{\delta}_L$ v oblasti obsahujúcej n štatistických vzoriek je :

$$E(\overline{\delta}_L) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n E(\delta_L^k)$$
(6.18)

 $E(\delta_L^k)$ - je očakávaná stredná hodnota výberovej koherencie pre k-tú vzorku. Vzťah medzi $E(\delta_L^k)$ a skutočnou koherenciou $\Delta = D \exp(j\beta)$ je:

$$E(\delta) = \frac{\Gamma^2(L+1/2)}{\Gamma(L)\Gamma(L+1)} D(1-D^2)^L \exp(j\beta) \times F(L+1/2, L+1/2; L+1; D^2)$$
(6.19)

β – je efektívny fázový rozdiel

Ako vidno zo vzťahu (6.19), odhad (6.17) je tiež skreslený, autori [13] však uvádzajú dôkaz, že za predpokladu, že obe signály sú komplexné a majú normálne rozdelenie s nulovou strednou hodnotou, tak pre dostatočne veľké L \approx 20 (relatívne malé) je L-pohľadová výberová (komplexná) koherencia prakticky neskreslená a $E(\delta_L^k) = \Delta^k$.

Priemerná koherencia (vypočítaná z magnitúdy):

Rovnakým spôsobom ako u priemernej komplexnej koherencie môžeme definovať priemernú veľkosť koherencie ako funkciu L-pohľadovej veľkosti výberovej koherencie d_L z $d = |\delta|$ ako:

$$\overline{\hat{D}} = \overline{d}_L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_L^i$$
(6.20)

Tento výpočet využíva priemerovanie len magnitúdy signálu na rozdiel od (6.17), kde sa využívajú komplexné signály. Na posúdenie presnosti takto vypočítaného priemeru z veľkosti (magnitúdy) koherencie vyjdeme z predpokladu, že pre oblasť obsahujúcu n vzoriek očakávaná hodnota \overline{d}_{L} je :

$$E(\bar{d}_{L}) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} E(d_{L}^{k})$$
(6.21)

 $E(\overline{d}_L^k)$ -je stredná hodnota veľkosti (magnitúdy) L-pohľadovej výberovej koherencie pre k-tú vzorku. Ak by bola veľkosť výberovej koherencie d_L^k každej vzorky neskreslená, potom :

$$\overline{\hat{D}} = E(\overline{d}_L) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n D^k$$
(6.22)

 D^k je skutočná veľkosť koherencie vzorky k a \overline{d}_L bude predstavovať správny odhad priemernej veľkosti koherencie. Pre štatisticky stabilnú oblasť existuje iba jeden štatistický súbor a veľkosť priemernej koherencie je identická s veľkosťou skutočnej koherencie zo základného štatistického výberu: $\overline{D} = D$. Fakt, že odhad výberovej koherencie je skreslený- $E(d_L)^k \neq D^k$ - spôsobí skreslený odhad \overline{D} . Vzhľadom na to, že pri priemerovaní sú použité odlišné súbory, vzniknuté skreslenie nie je možné odstrániť. Tento odhad bude preto v oblastiach s nízkou koherenciou vykazovať vyššie hodnoty ako v skutočnosti sú. Tento problém je možné minimalizovať vytvorením koherenčnej mapy s menším rozlíšením (L bude veľké). Rovnica (6.10) môže byť použitá na určenie takého počtu L, aby vzniknutá chyba bola nevýznamná pre hodnotu koherencie väčšiu ako je stanovená hranica [13]. Takýmto spôsobom môžu byť identifikované oblasti s nízkou koherenciou, pre ktoré by bol tento odhad skreslený, následne vylúčené a v ostatných oblastiach môže byť vytvorená koherenčná mapa s vyšším rozlíšením.

6.1.4 Odhad koherencie korigovaný o topografickú fázu

V niektorých nehomogénnych oblastiach javy zahrnuté v (6.7) nemôžu byť považované ani za stabilné v prírastkoch a koherencia nemôže byť určená ani lokálne. V niektorých aplikáciách môže byť zdroj nestability odstránený, čo umožní koherenciu následne vypočítať. Napríklad u SAR interferometrie, je nestabilita produktu $z_1 z_2^*$ pripisovaná fázovým zmenám spôsobeným topografiou. Fázová nestabilita môže byť v mieste i kompenzovaná fázovým faktorom exp(-j Φ_i) a namiesto výberovej koherencie δz (6.8) môžeme podľa [15] použiť výberovú fázovo korigovanú koherenciu δ_{TPC} :

$$\delta_{TPC} = \frac{\sum_{i=1}^{L} z_{1i} \, z_{2i} \, * \exp(-j\Phi_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{L} |z_{1i}|^2} \, \sqrt{\sum_{i=1}^{L} |z_{2i}|^2}}$$
(6.23)

 Φ – je systematický fázový komponent pre každý pixel

Po kompenzácii vplyvu fázy a za predpokladu, že hlavným zdrojom fázovej nestability sú zmeny topografickej fázy, procesy zahrnuté v (6.23) môžu byť považované za stabilné v rámci záujmovej oblasti a ich komplexný súčin má normálne rozdelenie s nulovou strednou hodnotou. Podobne ako u výberovej koherencie potom môžeme pre veľkosť fázovo korigovanej koherencie napísať: $d_{TPC} = |\delta_{TPC}|$. Pre odstránenie prípadného skreslenia je možné použiť niektorú z metód popísaných vyššie. Taktiež je podľa [16] možné použiť priestorové priemerovanie popísané vyššie, pričom je znova výhodnejšie priemerovať komplexné hodnoty, čo vedie priamo k neskreslenému odhadu.

6.2 Kvantitatívne hodnotenie kvality interferogramu

V predchádzajúcej časti boli predstavené metódy výpočtu koherenčných máp, ktoré môžu slúžiť mimo iného aj na určenie kvality interferogramu. Porovnať kvalitu viacerých interferogramov je možné napríklad vizuálnym zhodnotením príslušných koherenčných máp, alebo priamym porovnaním kvality interferometrických prúžkov. V niektorých prípadoch však nemusí byť rozdiel zjavný, a preto je pre správne porovnanie potrebná nejaká kvantitatívna

veličina, ktorej hodnota by nejakým spôsobom zachytávala kvalitu posudzovaného interferogramu. Takúto informáciu je možné získať napríklad kvantitatívnym vyhodnotením koherencie v záujmovej oblasti, alebo výpočtom sumy fázových rozdielov pre celý interferogram [17].

6.2.1 Kvantitatívne vyhodnotenie koherencie

Okrem hodnotenia kvality sa koherencia využíva na klasifikáciu povrchov a koherenčná mapa tiež môže slúžiť na výber koherentných oblastí vhodných na interferometrické spracovanie. V prípade príliš nízkej koherencie nie je možné v danej oblasti získať informáciu o topografii, alebo o zmenách. Z toho dôvodu je kvantitatívna informácia o koherencii veľmi dôležitá a mala by byť odhadnutá dostatočne presne. Podobne ako pri výpočte koherenčných máp, vytvorených využitím priestorového priemerovania hodnôt v okolí daného pixelu je možné kvantitatívnu hodnotu koherencie pre celý interferogram (alebo záujmovú oblasť) získať priestorovým priemerovaním komplexnej, alebo magnitúdovej koherenčnej mapy. Presnejším odhadom bude znova priemer z komplexnej mapy. V prípade, že plánujeme získanú kvantitatívnu informáciu použiť pri klasifikácii typov povrchu, je potrebné znovu niektorou zo štatistických metód odstrániť vzniknuté skreslenie. Ak má daný kvantitatívny odhad koherencie slúžiť na porovnanie kvality interferogramov, vzniknuté skreslenie nie je nutné odstrániť, pretože rovnakým spôsobom ovplyvní všetky posudzované interferogramy a na vzájomnom porovnaní sa neprejaví. Strednú (priemernú) hodnotu je vhodné doplniť histogramom, ktorý znázorňuje rozdelenie koherencie medzi jednotlivé pixely a tiež smerodatnou odchýlkou, ktorá popisuje rozptyl okolo strednej hodnoty. Pre posudzované interferogramy potom bude platiť, že čím vyššia je stredná hodnota a nižší rozptyl, tým vyššia je kvalita interferogramu.

6.2.2 Kvantitatívne hodnotenie kvality založené na fázových rozdieloch

Autori článku [17] si myslia, že vyššie uvedená metóda nie je najvhodnejšia na kvantitatívne posúdenie kvality, a to z toho dôvodu, že aj keď u dvoch interferogramov môže byť rozdelenie počtu pixelov v jednotlivých intervaloch koherencie odlišné, výsledné stredné hodnoty a smerodatné odchýlky môžu byť veľmi podobné. Preto zvolili iný prístup a uviedli metódu založenú na fázových rozdieloch.

Jednotlivé pixely v interferograme predstavujú fázové hodnoty. V prípade vysokej kvality je obraz tvorený plynulým prechodom hodnôt a neobsahuje škvrny, a preto ak je kvalita dobrá, fázové rozdiely medzi susediacimi pixelmi by mali byť malé, a teda aj suma všetkých fázových rozdielov by mala byť malá.

Presnejšie, informácia zachytená interferogramom je vyjadrená jedine fázou, a preto interferogram je v podstate fázový obraz tvorený dvojrozmerným relatívnym fázovým signálom. Absolútna hodnota fázy je zabalená do intervalu $[0,2\pi]$. Každý pixel interferogramu zodpovedá fázovej hodnote, ktorá je reprezentovaná farbou, výsledkom čoho sú farebné prúžky. Napríklad zelený prúžok môže označovať hodnotu fázy približne 2-radian, modrý fázu 4.5radiánu. Farebné prúžky sa postupne menia z červenej na zelenú, zo zelenej na modrú a z modrej na červenú. V skutočnosti to predstavuje fázovú zmenu z 0-radián na 2-radián, z 2-radian na 4.5radian a z 4.5-radian na 2π -radian.

V prípade kvalitného interferogramu by mala byť fázová zmena plynulá, a preto veľmi malá, v ideálnom prípade by to mala byť nekonečne malá hodnota. Ak dva pixely ležia na tom istom prúžku, pri dokonalom interferograme ich fázová zmena musí byť nula . V prípade, že sú dva pixely v susedných prúžkoch, ich fázový rozdiel by mal byť malý, pretože fáza by sa mala meniť plynule. Každý pixel obklopuje osem susedných pixelov, pre ktoré môžeme spočítať fázové rozdiely. Suma týchto fázových rozdielov by sa mala v ideálnom prípade tiež blížiť nule, a preto aj suma takýchto súm v rámci celého interferogramu by sa mala blížiť nule [17].

V skutočnosti z dôvodu existencie šumu nemusí byť hodnota fázového rozdielu medzi pixelmi ležiacimi v susedných prúžkoch blízka nule. Z tohto dôvodu bude aj celková suma oveľa väčšia. Porovnanie týchto súm potom môže slúžiť na hodnotenie kvality interferogramov, to znamená, že čím nižšia je suma fázových rozdielov v celom interferograme, tým lepšia je kvalita.

Pre každý pixel s polohou (x, y) potom môžme definovať sumu fázových rozdielov SPD_{local}:

$$SPD_{local}(x, y) = \sum_{l=1}^{1} \sum_{k=1}^{1} \left| \varphi(x, y) - \varphi(x+l, y+k) \right|$$
(6.24)

Kde x = 0, 1, 2,, p-1; y = 0, 1, 2, ..., q-1, a rozmer interferogramu je p \times q.

Pri tomto výpočte je treba zohľadniť jeden špecifický prípad, a to keď sa hodnota fázy mení z 2π radian na 0 radian. V takomto prípade nám vyjde hodnota fázového rozdielu 2π , pričom by v skutočnosti mala byť 0 a treba ju preto na túto hodnotu zmeniť. Treba tiež pripomenúť, že z dôvodu, aby sa odstránil systematický vplyv, je vo výpočte (6.24) použitá sploštená fáza (zbavená vplyvu referenčnej fázy).

Pre celý interferogram potom môžeme definovať sumu lokálnych fázových rozdielov SPD:

$$SPD = \sum_{x=0}^{p-1} \sum_{y=0}^{q-1} SPD_{local}(x, y)$$
(6.25)

Je potrebné si uvedomiť, že hodnota SPD bude v skutočnosti oveľa väčšia z toho dôvodu, že niektoré fázové rozdiely sú opakovane vypočítané a spočítané dohromady. To však ovplyvní iba absolútnu hodnotu, pričom pri relatívnom porovnaní viacerých interferogramov sa nijako neprejaví [17]. Autori tiež uvádzajú iný spôsob výpočtu a to pomocou priemeru sumy lokálnych fázových rozdielov APD_{local}

$$APD_{local}(x, y) = \frac{1}{8} \sum_{l=1}^{1} \sum_{k=1}^{l} \left| \varphi(x, y) - \varphi(x+l, y+k) \right|$$
(6.26)

a následným výpočtom SPD podľa (6.25). Tiež je možné namiesto absolútnych hodnôt fázových rozdielov použiť štvorce fázových rozdielov. Vzhľadom na to, že sa jedná o relatívny klasifikátor presnosti, tieto variácie nemajú väčší význam.

Autori ďalej uvádzajú výsledky série testov, pri ktorých bol do umelo generovaného interferogramu z DMT pridávaný šum. Najprv sa jednalo o šum pridaný priamo k hodnotám fázy a následne o šum DMT. Výsledky v oboch prípadoch ukázali takmer lineárnu závislosť medzi množstvom pridaného šumu a SPD.

7 Porovnanie metód hodnotenia kvality interferogramu

Medzi najvýraznejšie dekorelačné faktory patrí časová a geometrická dekorelácia. Za účelom posúdenia vplyvu týchto faktorov na predpokladanom stabilnom a nestabilnom území a tiež za účelom porovnania jednotlivých metód hodnotenia kvality interferogramu bolo vytvorených 20 interferogramov. Na tvorbu interferogramov bol použitý program DORIS, pričom sa postupovalo podľa krokov popísaných v kapitole 3.2. Vytvorené interferogramy boli rozdelené do štyroch skupín:

- **1)Analýza vplyvu časovej základne na predpokladanom stabilnou území** (príloha č.1, skupina č.1; príloha č.2, Tab.č.3)
- **2)Analýza vplyvu časovej základne na predpokladanom nestabilnom území** (príloha č.1, skupina č.2; príloha č.2, Tab.č.4)
- **3)Analýza vplyvu priestorovej základne na predpokladanom stabilnou území** (príloha č.1, skupina č.3; príloha č.2, Tab.č.5)
- **4)Analýza vplyvu priestorovej základne na predpokladanom nestabilnom území** (príloha č.1, skupina č.4; príloha č.2, Tab.č.6)

Ako stabilné územie bola zvolená oblasť v okolí obce Louny, za nestabilné bolo zvolené územie v okolí mesta Most. V oboch prípadoch boli použité výrezy snímkov ERS 1,2 o veľkosti 1024 pixelov v smere range a 4096 pixelov v smere azimutu, čo zodpovedá zhruba územiu o rozlohe 25,5 x 18,5km. Pri výbere snímkov za účelom posúdenia vplyvu časovej dekorelácie boli volené snímky s minimálnou priestorovou základňou a postupne rastúcou časovou základňou. Naopak pri hodnotení kolmej základne boli snímky vyberané tak, aby bola časová základňa čo najmenšia a priestorová sa postupne zväčšovala. Z dôvodu nedostatku spracovaných snímkov nebola táto podmienka ani v jednom prípade úplne dodržaná. Teoreticky by sa mala s rastúcou časovou, ale aj kolmou základňou zväčšovať dekorelácia interferogramu, a teda klesať jeho kvalita. Do značnej mieri je možné tento vplyv pozorovať aj vizuálnym porovnaním interferogramov, súčasťou tejto práce je však aj posúdenie rôznych metód výpočtu kvality interferogramu, a preto vplyv časovej a kolmej základne je možné pozorovať na konkrétnych číslach (príloha č.2, tabuľka č.3-6).

7.1 Porovnanie metód

Za účelom posúdenia kvality bolo porovnaných niekoľko metód. Jedná sa o výpočet kvality založený na fázových rozdieloch a rôzne spôsoby výpočtu koherencie.

7.1.1 Výpočet SPD

Podľa spôsobu popísanom v kapitole 6.2.2 boli pre jednotlivé interferogramy spočítané hodnoty SPD. K tomuto výpočtu bol použitý program MATLAB. V DORISE boli najprv pomocou skriptu cpxfiddle z komplexných interferogramov vyrezané hodnoty fázy. Tie boli následne pomocou ďalšieho skriptu freadbk importované do matice v MATLABE. K samotnému výpočtu bol vytvorený program, pozostávajúci z rovníc uvedených v 6.2.2. Porovnaním výsledkov s jednotlivými interferogramami bolo zistené, že hodnoty SPD v niektorých prípadoch nezodpovedajú kvalite interferogramov. Chyba hodnoty SPD bola najvýraznejšia v prípade interferogramu 4a). Tento interferogram mal malú priestorovú základňu, a teda malú hustotu interferometrických prúžkov, jeho kvalita však bola pomerne vysoká, čomu nezodpovedala hodnota SPD (príloha č.2,tabuľka č.6, interferogram 4a). Tento problém bol spôsobený tým, že interferogram 4a) obsahoval rozsiahle oblasti s hodnotami blízkymi 0 a 2π . Podmienka uvedená v [17] - keď sa fáza mení z 2π na 0, hodnotu fázového rozdielu treba zmeniť z 2π na 0 nie je postačujúca. V prípade, že hodnota centrálneho pixelu je 1,99 π a hodnota susedného pixelu je $0,01 \pi$, fázový rozdiel bude rovný $1,99 \pi$ - $0,01 \pi$ = $1,98 \pi$. V skutočnosti však hodnota fázového rozdielu by mala byť 0,02 π . V podstate u cyklických dát, kde sa hodnota mení z 0 na 2π a plynule ďalej na 0, môže byť veľkosť rozdielu dvoch pixelov rovná maximálne polovici cyklu. To znamená, že maximálny fázový rozdiel môže byť π . Vyššie popísaný výpočet bol doplnený o túto podmienku a následne boli spočítané hodnoty SPD_{upr}. Takto upravené hodnoty SPD_{upr} priamo odrážajú kvalitu interferogramu, čo neskôr potvrdil aj výpočet koherencie (viď príloha č.2, tabuľka č.3-6).

7.1.2 Výpočet koherencie

Pri výpočte koherencie boli najprv pomocou programu DORIS vytvorené príslušné koherenčné mapy pri rôznych faktoroch multilooku L a rôznej veľkosti pohyblivého okna N. Jednalo sa o tieto parametre:

L=20, N=1 (toto nastavenie zodpovedá výpočtu výberovej koherencie (6.8))

L=5, N=180

L=20, N=20

L=15, N=80 (posledné 3 nastavenia zodpovedajú priestorovému priemerovaniu podľa (6.17))

Pomer (range k azimutu) pri voľbe multilooku a pohyblivého okna bol vo všetkých prípadoch 1 ku 5 a to z toho dôvodu, aby pohyblivé okno a tiež výsledné pixely boli zhruba štvorcové.

Z magnitúdy takto vytvorených koherenčných máp boli následne pre celý interferogram v MATLABE spočítané stredné hodnoty a smerodatné odchýlky (rozptyl). V niektorých prípadoch boli pre porovnanie vytvorené histogramy. Pre výrez magnitúdy z komplexnej koherenčnej mapy a pre jej import do matice v MATLABE boli znova použité skripty *cpxfiddle* a *freadbk*. Výsledné stredné hodnoty a smerodatné odchýlky sú uvedené v príloha č.2, tabuľkách č.3-6.

V prílohe č.3 sú zobrazené koherenčné mapy a príslušné histogramy pre vybrané rôzne dekorelované interferogramy. Porovnaním týchto máp, stredných hodnôt a histogramov je možné zistiť ako sa jednotlivé odhady správajú. Výberová koherencia (L=20, N=1), ako bolo ukázané v (6.1.2), spôsobuje nadhodnotenie koherencie. V prípade použitého L=20, podľa kapitole obr.č.15 k tomu dochádza výrazne iba v oblastiach s koherenciou nižšou ako 0,3. Porovnaním všetkých odhadov zistíme, že výberová koherencia pre interferogramy s celkovou koherenciou nižšou ako 0,4, vykazuje vyššie hodnoty ako všetky ostatné odhady. Ostatné odhady, využívajúce priestorové priemerovanie, vykazujú v porovnaní s výberovou koherenciou u nekvalitných interferogramov nižšie hodnoty, u kvalitných naopak vyššie. V prípade, že sa v oblasti nižšej koherencie nachádza niekoľko pixelov vyššej koherencie, dôjde k ich spriemerovaniu a ich vplyv sa stratí, to platí aj naopak. Tento fakt spôsobí, že koherenčné mapy s vyšším N sú kontrastnejšie a menej zašumené, hodnoty koherencie pixelov však nezodpovedajú skutočnosti, ak priemerovaná oblasť nie je štatisticky stabilná. Priemerné hodnoty potom sú u interferogramov s vyššou koherenciou posunuté k vyšším hodnotám, u interferogramov s nižšou koherenciou naopak k nižším.



Obr.č. 16 – porovnanie priemerných hodnôt koherencií pre interferogramy zoradené podľa kvality od 1-20.

7.1.3 Porovnanie

Všetky interferogramy boli zoradené od 1 po 20 podľa výsledkov SPD_{upr} tak, že 1 odpovedá najkvalitnejšiemu a 20 najnekvalitnejšiemu (tabuľka č. 2). Usporiadanie podľa hodnôt SPD_{upr} zodpovedalo aj vizuálnemu porovnaniu a tiež usporiadaniu podľa hodnôt koherencie. V prípade koherencie vypočítanej z koherenčných máp s parametrami L=20, N=1 a L=20, N=20 sa jedná o stopercentnú zhodu. U ďalších výpočtov koherencie však boli niektoré, veľmi podobné dvojice zoradené nesprávne (v Tab.č.2 označené červeno). U výpočtu koherencie z koherenčných máp s parametrami L=45, N=80 išlo o dve dvojice, u máp s L=5, N=180 o tri dvojice. K tejto chybe došlo pravdepodobne preto, že v oboch prípadoch boli použité značne veľké pohyblivé okná, v rámci ktorých nebola priemerovaná oblasť štatisticky stabilná, čo viedlo k mierne skresleným odhadom koherencie v jednotlivých bodoch, a teda aj k skreslenému celkovému odhadu. U prvého výpočtu SPD je vidieť, že veľké množstvo interferogramov bolo zoradených nesprávne a tento odhad nemôže byť bez doplňujúcej podmienky použitý na určovanie kvality interferogramov.

		SPD	SPDupr	koherencia		koherencia		koherencia		koherencia	
int	interf. $x 10^7$ $x 10^7$		L=20,N=1		L=5,N=180		L=20,N=20		L=45,N=80		
				\overline{d}	σ	\overline{d}	σ	\overline{d}	σ	\overline{d}	σ
1	3c	4,4380	3,0790	0,6961	0,2257	0,7202	0,2444	0,7494	0,2293	0,7289	0,2385
2	4c	4,6156	3,1838	0,6718	0,2130	0,6908	0,2227	0,7303	0,2066	0,7033	0,2140
3	4a	6,0172	3,2195	0,6383	0,2006	0,7024	0,1955	0,7092	0,1933	0,7036	0,1912
4	3a	6,5054	3,8369	0,4908	0,2235	0,5148	0,2327	0,5345	0,2323	0,5170	0,2317
5	3b	5,8863	4,1839	0,4024	0,1926	0,3879	0,1905	0,4229	0,1983	0,3916	0,1914
6	2b	6,3674	4,2597	0,3795	0,1985	0,3367	0,2167	0,3858	0,2134	0,3425	0,2144
7	4b	5,9992	4,2998	0,3714	0,1798	0,3468	0,1645	0,3839	0,1805	0,3498	0,1659
8	1b	6,3965	4,3497	0,3537	0,1918	0,2826	0,2135	0,3452	0,2074	0,2913	0,2110
9	1c	6,2094	4,5028	0,3150	0,1614	0,2240	0,1499	0,2961	0,1594	0,2344	0,1491
10	2c	6,2325	4,5330	0,3066	0,1563	0,2132	0,1370	0,2847	0,1512	0,2227	0,1362
11	2e	6,2934	4,5794	0,2795	0,1446	0,1473	0,1216	0,2387	0,1339	0,1599	0,1171
12	1e	6,3111	4,5929	0,2741	0,1409	0,1334	0,1096	0,2292	0,1259	0,1471	0,1049
13	1d	6,3681	4,6252	0,2696	0,1370	0,1227	0,0900	0,2221	0,1171	0,1375	0,0882
14	2d	6,3450	4,6337	0,2695	0,1369	0,1233	0,0872	0,2210	0,1158	0,1374	0,0867
15	1f	6,3762	4,6517	0,2667	0,1354	0,1171	0,0824	0,2175	0,1134	0,1319	0,0809
16	2f	6,3853	4,6565	0,2659	0,1350	0,1148	0,0735	0,2153	0,1107	0,1297	0,0755
17	4d	6,5586	4,8329	0,2566	0,1310	0,1109	0,0674	0,2067	0,1071	0,1246	0,0709
18	3d	6,5770	4,8485	0,2559	0,1306	0,1098	0,0682	0,2051	0,1067	0,1235	0,0715
19	4e	6,8377	5,1105	0,2384	0,1247	0,1056	0,0733	0,1888	0,1038	0,1142	0,0743
20	3e	6,8704	5,1420	0,2303	0,1194	0,0911	0,0593	0,1751	0,0930	0,0996	0,0597

Tab.č. 2 – Porovnanie jednotlivých metód

7.2 Časová základňa

Zmenu dekorelácie v závislosti na časovej základni znázorňujú Tab.č.3 a Tab.č.4 v prílohe č.2. V prípade oboch území je na hodnotách v tabuľkách viditeľný rýchly nárast dekorelácie s rastúcou časovou základňou. Výnimku tvoria dvojice 1d, 1e a 2d, 2e s časovými základňami 5 mesiacov, 23 dní a 1 rok, 20 dní. V oboch prípadoch je interferogram s dlhšou časovou základňou kvalitnejší ako ten s kratšou, čo odporuje predpokladu. Tento rozpor je spôsobený pravdepodobne tým, že u interferogramov 1d, 2d s časovou základňou 5 mesiacov a 23 dní bol jeden so snímkov vytvorený v januári, zatiaľ čo druhý v júny. Zemský povrch bol v oboch prípadoch značne odlišný. V januári mohol byť pokrytý snehom a v júny bol pokrytý vegetáciou. Tento rozdiel výrazne prispel k zvýšeniu dekorelácie. Naopak u interferogramov

1e,2e bola síce časová základňa oveľa väčšia , snímky však boli vytvorené v približne rovnakom období roku a povrch mal podobné vlastnosti.

V prípade nestabilného územia bola očakávaná rýchlejšia časová dekorelácia, spôsobená pohybmi povrchu. Z dôvodu nedostatku dát nie je možné túto súvislosť dokázať.

7.3 Priestorová základňa

V prílohe č.2, Tab.č.4 a Tab.č.5 zachycujú vývoj dekorelácie ako funkciu kolmej základne. V oboch prípadoch s rastúcou priestorovou základňou stúpa dekorelácia. U posledných dvoch interferogramov však k tomu do značnej miery prispela väčšia časová základňa. Tú z dôvodu nedostatku snímkov nebolo možné zvoliť menšiu. Jedinou výnimkou v oboch prípadoch sú interferogramy 3c a 4c s priestorovou základňou 160m, ktoré vykazujú najvyššiu kvalitu, pritom by mali byť až na 3. mieste. Tento interferogram bol vytvorený v čase, keď na stromoch neboli listy, čo spomalilo jeho dekoreláciu. Kvalita prvých dvoch interferogramov mohla byť znížená prítomnosťou listov vo vegetácií, alebo chybami pri koregistrácii. Kvalitu tiež mohol ovplyvniť rozdiel vo frekvenciách Dopplerovho centroidu pri snímkoch tvoriacich interferogram.

Stabilita územia nemá na geometrickú dekoreláciu žiadny vplyv v prípade, že snímky boli vytvorené v rovnakom čase, a teda nemohlo medzi nimi dôjsť k pohybom terénu. Ak snímky neboli vytvorené v rovnakom čase, mohlo medzi nimi dôjsť k deformačným zmenám povrchu. Ako tieto zmeny ovplyvnia geometrickú dekoreláciu nie je z dôvodu nedostatku spracovaných dát možné zistiť.

8 Záver

Hlavnou náplňou tejto práce bolo porovnať rôzne metódy hodnotenia kvality interferogramu a analyzovať faktory ovplyvňujúce dekoreláciu. Pri tvorbe koherenčných máp bolo použitých niekoľko spôsobov odhadu koherencie. Jednalo sa o výpočet výberovej koherencie pri faktore multilooku L=20 a o odhady koherencie využívajúce priestorové priemerovanie L-pohľadových vzoriek pri rôznych faktoroch multilooku L a veľkosti pohyblivého okna N. Mapy vytvorené odhadom výberovej koherencie sú značne zrnité a v silne dekorelovaných oblastiach sú odhady koherencie posunuté k vyšším hodnotám. Toto skreslenie je možné odstrániť zvýšením počtu L, čím sa ale zníži rozlíšenie mapy, prípadne použitím priestorového priemerovania podľa (6.17) v preddefinovanej oblasti N. Takto vytvorené mapy boli oveľa menej zrnité a kontrastnejšie. Pri veľkých hodnotách N je však pravdepodobné, že hodnoty koherencie v jednotlivých pixeloch nie sú správne a to z toho dôvodu, že priemerovaná oblasť N nie je štatisticky stabilná. To pravdepodobne spôsobilo aj nesprávne zoradenie interferogramov pri kvantitatívnom vyhodnotení u koherenčných máp vytvorených s N=80 a N=180. Ako celkom vhodné sa ukázalo nastavenie L=20, N=20, kde priestorovým priemerovaním vznikli mapy menej zrnité, chyby spôsobené štatistickou nestabilitou v oblasti N však boli relatívne malé a to preto, lebo celková oblasť N bola relatívne malá. To umožnilo aj správne kvantitatívne vyhodnotenie.

Celkovo však nastavenie parametrov N a L závisí na aplikácii, pri ktorej bude daná koherenčná mapa použitá. Všeobecne zvýšením počtu L dôjde k zníženiu skreslenia spôsobeného v oblastiach s nižšou koherenciou, spôsobí to však aj pokles rozlíšenia. Pri potrebe mapy s vyšším rozlíšením je možné najprv pri vyššom L určiť oblasti s dostatočne veľkou koherenciou a v tých potom spočítať koherenciu znovu pri menšom L a teda vyššom rozlíšení. Použitie priestorového priemerovania zníži zrnitosť a skreslenie, použité okno N však nesmie byť príliš veľké, aby oblasť v rámci neho mohla byť považovaná za štatisticky stabilnú.

Aj napriek tomu je však odhad koherencie nejako skreslený. V prípade, že má odhad koherencie slúžiť na určenie fázových štatistík, sú vyššie popísané spôsoby správne, ak má byť koherencia použitá napríklad na klasifikáciu typov povrchu, je potrebné odstrániť vplyv systematických zmien fázy v rámci pohyblivého okna N [3]. K tomu slúži odhad koherencie korigovaný o topografickú fázu (6.23). Skreslenie odhadu koherencie je možné tiež korigovať použitím niektorej zo štatistických metód popísaných v kapitole 6.

Pri kvantitatívnom posudzovaní kvality bola otestovaná metóda využívajúca fázové rozdiely, tá sa po drobnej úprave (viď 7.1.1) ukázala ako veľmi vhodná na kvantitatívne hodnotenie kvality interferogramu. Dokáže porovnávať aj kvalitu interferogramov odlišných oblasti. Jej hlavnou nevýhodou je, že posudzované interferogramy musia mať rovnakú veľkosť a rozlíšenie, čiže rovnaký počet pixelov.

Rovnaké výsledky ako SPD_{upr} dávali aj priemerné hodnoty koherencie pre celé interferogramy. Výnimkou boli koherencie spočítané s príliš veľkým pohyblivým oknom N, ktoré v niekoľkých prípadoch zaradili interferogramy nesprávne. Ak pohyblivé okno N nie je príliš veľké a priemerovaná oblasť v rámci neho je štatisticky stabilná, môže byť priemerná veľkosť koherencie celého interferogramu použitá na kvantitatívne porovnanie kvality interferogramov. Výhodou oproti SPD_{upr} je možnosť porovnania interferogramov s odlišným celkovým počtom pixelov, pričom tiež umožňuje porovnávať interferogramy odlišných oblastí.

Jednotlivé faktory ovplyvňujúce dekoreláciu sú uvedené v kapitole 5. Dva najvýznamnejšie – časová a geometrická dekorelácia, boli analyzované aj na konkrétnych interferogramoch. Aj keď ich vplyv je na spracovaných dátach pozorovateľný, k vysloveniu konkrétnych záverov by bolo nutné spracovať oveľa väčšie množstvo interferogramov.

9 Použitá literatúra

[1] Richard Bamler, Philipp Hartl. Synthetic aperture radar interferometry. IOP Publishing LTD, 1998. 54 p. PII: S0266-5611(98)78649-6

[2] Ing. Petr Urban: Studie k disertační práci - Detekce polohových změn zemského povrchu radarovou interferometrií. Praha, květen 2002

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

[4] B. Kampes. DORIS manual. http://enterprise.lr.tudelft.nl/doris/usermanual/.

[5] Ing. Ivana Čapková, Diploma Thesis - Satellite Orbit Errors and Their Influence on Interferograms, Praha, květen 2005

[6] Roland Burgmann, Paul A. Rosen, Eric J. Fielding : Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Sourface Topography and Its Deformation. Anu. Rev. Earth Planet. Sci. 28:169-209, 2000

[7] Centre for the Observation and Modelling of Earthquakes and Tectonics. http://comet.nerc.ac.uk/

[8] European Space Agency. http://www.esa.int/esaCP/index.html

[9] C. W. Chen and H. A. Zebker. Two-dimensional phase unwrapping using statistical models for cost functions in nonlinear optimization. Journal of the Optical Society of America A., 18:338–351, Feb 2000.

[10] Dimitri Moisseev, Ramon Hanssen, Joaquín Sabater. Towards an atmosphere free interferogram. Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 2003,vol.5, pp: 2977 – 2980, 2003

[11] M. Jehle, O. Frey, D. Small, E. Meier, and D. Nesch. Improved knowledge of SARgeometry through atmospheric modelling. In eusar2004, pages 909–911, 2004.

[12]M. R. Foster, N. J. Guinzy. The coefficient of coherence: its estimation and use in geophysical data processing. Geophysics, vol.32, no.4, pp. 602-616,1967

[13] Ridha Touzi, Armand Lopes, Jerome Bruniquel, Paris W. Vachon. Coherence Estimation for SAR Imagery. IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 37, pp 135-149, Jan. 1999

[14] Ridha Touzi, Armand Lopes.Statistics of Stokes parameters and of the complex coherence parameters in one-look and multilook speckle field. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol. 34, pp 519-532, Mar. 1996

[15] J.O. Hagberg, L. M. H Ulander, J. Askne. Repeet-pass SAR interferometry over forested terain. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol. 33, pp 331-340, Mar. 1995

[16] Yanjie Zhang, Veronique Prinet. InSAR Coherence Estimation. Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 2004,vol.5, pp. 3353- 3355, 2004

[17] Zhilin Li, Weibao Zou, Xiaoli Ding, Yongqi Chen, Guoxiang Liu . A Quantitative Measure for the Quality of InSAR Interferograms Based on Phase Differences. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing,vol.70, no.10, pp. 1131- 1137, Oct. 2004

[18] Howard. A. Zebker, Charles L. Werner, Paul A. Rosen, Scott Hensley. Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Radar. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol. 32, no.4, pp 823-836, Jul. 1994

[19] C. W. Chen and H. A. Zebker. Phase unwrapping for large SAR interferograms: statistical segmentation and generalized network models. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(8):1709–1719, aug 2002.

[20] Bert M. Kampes, Ramon F. Hanssen, Zbigniew Perski. Radar interferometry with public domain tools. Third International Workshop on ERS SAR Interferometry, *FRINGE03'*, Frascati, Italy, page 6 pp., Dec. 2003.

Príloha č.1 – Interferogramy a príslušné koherenčné mapy

Skupina č.1 – analýza časovej základne na stabilnom území :



1a) Interferogram, časová základňa 1 deň, kolmá základňa 23m; koherenčná mapa, L=20, N=20



1b) Interferogram, časová základňa 34 dní, kolmá základňa 4m; koherenčná mapa, L=20, N=20



1c) Interferogram, časová základňa 2 mesiace 7 dní, kolmá základňa 77m; koherenčná mapa, L=20, N=20


1d) Interferogram, časová základňa 5 mesiacov 23 dní, kolmá základňa 6m; koherenčná mapa, L=20, N=20



1e) Interferogram, časová základňa 1 rok, 20 dní, kolmá základňa 15m; koherenčná mapa, L=20, N=20



1f) Interferogram, časová základňa 2 roky, 3mesiace, 20 dní, kolmá základňa 91m; koherenčná mapa, L=20, N=20

Skupina č.2 – analýza časovej základne na nestabilnom území :



2a) Interferogram, časová základňa 1 deň, kolmá základňa 23m; koherenčná mapa, L=20, N=20



2b) Interferogram, časová základňa 34 dní, kolmá základňa 4m; koherenčná mapa, L=20, N=20



2c) Interferogram, časová základňa 2 mesiace 7 dní, kolmá základňa 77m; koherenčná mapa, L=20, N=20



2d) Interferogram, časová základňa 5 mesiacov 23 dní, kolmá základňa 6m; koherenčná mapa, L=20, N=20



2e) Interferogram, časová základňa 1 rok, 20 dní, kolmá základňa 15m; koherenčná mapa, L=20, N=20



2f) Interferogram, časová základňa 2 roky, 3mesiace, 20 dní, kolmá základňa 91m; koherenčná mapa, L=20, N=20

Skupina č.3 – analýza priestorovej základne na stabilnom území :



3a) Interferogram, kolmá základňa 23m, časová základňa 1 deň; koherenčná mapa, L=20, N=20



3b) Interferogram, kolmá základňa 69m, časová základňa 1 deň; koherenčná mapa, L=20, N=20



3c) Interferogram, kolmá základňa 160m, časová základňa 1 deň; koherenčná mapa, L=20, N=20



3d) Interferogram, kolmá základňa 228m, časová základňa 2 mesiace,10 dní; koherenčná mapa, L=20, N=20



3e) Interferogram, kolmá základňa 440m, časová základňa 1 mesiac, 3 dni; koherenčná mapa, L=20, N=20

Skupina č.4 – analýza priestorovej základne na nestabilnom území :



4a) Interferogram, kolmá základňa 23m, časová základňa 1 deň; koherenčná mapa, L=20, N=20



4b) Interferogram, kolmá základňa 69m, časová základňa 1 deň; koherenčná mapa, L=20, N=20



4c) Interferogram, kolmá základňa 160m, časová základňa 1 deň; koherenčná mapa, L=20, N=20



4d) Interferogram, kolmá základňa 228m, časová základňa 2 mesiace,10 dní; koherenčná mapa, L=20, N=20



4e) Interferogram, kolmá základňa 440m, časová základňa 1 mesiac, 3 dni; koherenčná mapa, L=20, N=20

	č <u>.</u> snímku	č. snímku	časová	kolmá	SPD	SPDupr	kohe L=2(rencia),N=1	kohe L=5,I	rencia V=180	kohe L=20	rencia ,N=20	koher L=45	rencia N=80
Intert.	(master)	(slave)	zakladha	zakladha	X 10	X TU	\overline{d}	a	\overline{d}	a	\overline{d}	σ	\overline{d}	a
1a	4757	24430	1d	23m	6,5054	3,8369	0,4908	0,2235	0,5148	0,2327	0,5345	0,2323	0,5170	0,2317
1b	23294	23795	34d	4m	6,3965	4,3497	0,3537	0,1918	0,2826	0,2135	0,3452	0,2074	0,2913	0,2110
1c	23428	24430	2m, 10d	77m	6,2094	4,5028	0,3150	0,1614	0,2240	0,1499	0,2961	0,1594	0,2344	0,1491
1d	23428	25933	5m, 23d	6m	6,3681	4,6252	0,2696	0,1370	0,1227	0,0900	0,2221	0,1171	0,1375	0,0882
1e	9767	15278	1r, 20d	15m	6,3111	4,5929	0,2741	0,1409	0,1334	0,1096	0,2292	0,1259	0,1471	0,1049
ſf	23428	15779	2r, 3m, 20d	91m	6,3762	4,6517	0,2667	0,1354	0,1171	0,0824	0,2175	0,1134	0,1319	0,0809
							•	•						

Analýza vplyvu časovej základne na predpokladanom stabilnou území

Tab.č. 3 – Hodnotenie kvality interferogramov

Analýza vplyvu časovej základne na predpokladanom nestabilnom území

interf	č. snímku (master)	č. snímku (clave)	časová základňa	kolmá základňa	SPD	SPD _{upr}	kohei L=20	encia),N=1	kohe L=5,	rencia N=180	kohe L=20	rencia ,N=20	kohei L=45	encia N=80
	(ווומסובו /	(סומעב)	Laviania		> c	>	\overline{d}	σ	\overline{d}	a	\overline{d}	a	\overline{d}	a
2a	4757	24430	1d	23m	6,0172	3,2195	0,6383	0,2006	0,7024	0,1955	0,7092	0,1933	0,7036	0,1912
2b	23294	23795	34d	4m	6,3674	4,2597	0,3795	0,1985	0,3367	0,2167	0,3858	0,2134	0,3425	0,2144
2c	23428	24430	2m, 10d	77m	6,2325	4,5330	0,3066	0,1563	0,2132	0,1370	0,2847	0,1512	0,2227	0,1362
2d	23428	25933	5m, 23d	6m	6,3450	4,6337	0,2695	0,1369	0,1233	0,0872	0,2210	0,1158	0,1374	0,0867
2e	9767	15278	1r, 20d	15m	6,2934	4,5794	0,2795	0,1446	0,1473	0,1216	0,2387	0,1339	0,1599	0,1171
2f	23428	15779	2r, 3m, 20d	91m	6,3853	4,6565	0,2659	0,1350	0,1148	0,0735	0,2153	0,1107	0,1297	0,0755
						TT J								

Tab.č. 4 – Hodnotenie kvality interferogramov

Príloha č.2 – Hodnotenie kvality interferogramov

	3e	3d	3c	3b	За	interf.	
	5759	9266	43468	23428	4757	······	č. snímku (master)
	25933	10268	23795	3755	24430	100000	č. snímku (slave)
	440m	228m	160m	69m	23m		kolmá základňa
Tab.č. 5 – Hodnotenie kvality interferogramov	1m, 3d	2m, 10d	1d	1d	1d		časová základňa
	6,8704	6,5770	4,4380	5,8863	6,5054		SPD
	5,1420	4,8485	3,0790	4,1839	3,8369	;	SPD _{upr}
	0,2303	0,2559	0,6961	0,4024	0,4908	\overline{d}	kohei L=2(
	0,1194	0,1306	0,2257	0,1926	0,2235	q	rencia),N=1
	0,0911	0,1098	0,7202	0,3879	0,5148	d	kohe L=5,I
	0,0593	0,0682	0,2444	0,1905	0,2327	٩	rencia V=180
	0,1751	0,2051	0,7494	0,4229	0,5345	d	kohe L=20
	0,0930	0,1067	0,2293	0,1983	0,2323	۹	rencia ,N=20
	0,0996	0,1235	0,7289	0,3916	0,5170	d	kohe L=45
	0,0597	0,0715	0,2385	0,1914	0,2317	۹	rencia ,N=80

Analýza vplyvu priestorovej základne na predpokladanom stabilnou území

Analýza vplyvu priestorovej základne na predpokladanom nestabilnom území

	4e	4d	4c	4b	4a		interf.
	5759	9266	43468	23428	4757	1	č. snímku (master)
	25933	10268	23795	3755	24430	1010101	č. snímku (slave)
	440m	228m	160m	69m	23m		kolmá základňa
	1m 3d	2m 10d	1d	1d	1d		časová základňa
Tab.č. 6 – Hodnoter	6,8377	6,5586	4,6156	5,9992	6,0172		sPD x 10 ⁷
	5,1105	4,8329	3,1838	4,2998	3,2195		SPD _{upr}
nie kvalit	0,2384	0,2566	0,6718	0,3714	0,6383	d	kohe L=2(
y interfer	0,1247	0,1310	0,2130	0,1798	0,2006	q	rencia),N=1
ogramov	0,1056	0,1109	0,6908	0,3468	0,7024	d	kohe L=5,
	0,0733	0,0674	0,2227	0,1645	0,1955	q	rencia N=180
	0,1888	0,2067	0,7303	0,3839	0,7092	d	kohe L=20
	0,1038	0,1071	0,2066	0,1805	0,1933	q	rencia ,N=20
	0,1142	0,1246	0,7033	0,3498	0,7036	d	kohe L=45
	0,0743	0,0709	0,2140	0,1659	0,1912	q	rencia ,N=80

SPD – je suma fázových rozdielov podľa (6.25)
SPD_{upr} – je suma fázových rozdielov s doplňujúcou podmienkou popísanou v 7.1 – výpočet SPD

 \overline{d} - je priemerná veľkosť koherencie v celom interferograme, vzniknutá priemerovaním magnitúdy koherenčných máp vytvorených s rôznym faktorom multilooku L a rôznou veľkosť ou pohyblivého okna

 σ – je smerodatná odchýlka, v tomto prípade nejde o chybu určenia koherencie, ale o rozptyl okolo strednej hodnoty

Príloha č.2 – Porovnanie výpočtov koherencie na rôzne dekorelovaných interferogramoch

Interferogram 3c:

L=20, N=1



L=5, N=180



 \overline{d} =0,6961 , σ =0,2257











L=15, N=80



Interferogram 1a:





L=20, N=1



L=5, N=180



 \overline{d} =0,4908 , σ =0,2235











L=15, N=80



Interferogram 1b:







L=5, N=180



 \overline{d} =0,3537, σ =0,1918











L=15, N=80



Interferogram 3e:







0.9

0.9

