

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



Fakulta stavební, obor Geodézie a kartografie

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Filtrace interferometrických dat

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

Konzultant diplomové práce: Ing. Ivana Hlaváčová

Červen 2006

Květa Capaliniová

### Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci, včetně všech příloh, vypracovala samostatně a veškeré písemné podklady, ze kterých jsem čerpala, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze 2. 6. 2006

Květa Capaliniová

---

## Anotace

Diplomová práce se zabývá radarovou interferometrií a spektrálním filtrováním obrazových dat ve směru azimutu a range. Předmětem této práce je teoretické zdůvodnění nutnosti aplikace spektrálního filtrování za účelem zlepšení koherence a odstranění šumu v interferogramech. Dále jsou zde uvedeny výsledky testování uvedené teorie na radarových SAR snímcích z družic ERS-1/2.

Kromě toho diplomová práce obsahuje anglicko - český slovník použité terminologie, včetně výkladů jednotlivých pojmů.

## Abstract

This thesis deals with SAR interferometry and spectral filtering of SAR images in the azimuth and range directions. The theory and the need for spectral filtering for coherence improvement and noise reduction is discussed. The influence of spectral filtering is also shown in the experimentation.

In addition, this thesis includes the dictionary of terms.

## Obsah

1. Úvod.....	1
1.1 Popis problému a cíl práce.....	1
1.2 Struktura práce.....	2
2. Základní informace o radarech.....	3
2.1 Princip radaru.....	3
2.2 Radar se syntetickou aperturou.....	6
2.3 Princip Dopplerova efektu frekvenčních posunů.....	7
2.4 Družice s radarem se syntetickou aperturou.....	9
2.4.1 European Remote Sensing Satellite (ERS-1/2).....	10
3. Princip radarové interferometrie.....	12
3.1 Základní geometrie.....	12
3.1.1 Konfigurace a metody radarové interferometrie.....	13
3.1.2 Zobrazení radaru se syntetickou aperturou.....	15
3.2 Tvorba interferogramu.....	17
3.3 Diferenciální interferometrie.....	21
3.4 Přesnost radarové interferometrie.....	22
4. Spektrální filtrování.....	24
4.1 Signál a váhové funkce.....	24
4.2 Frekvenční posun ve směru kolmém na směr letu (směr range).....	27
4.2.1 Spektrum.....	27
4.2.2 Posun spekter.....	27
4.3 Frekvenční posun ve směru letu (směr azimutu).....	34
4.3.1 Spektrum.....	34
4.3.2 Posun spekter.....	35
4.4 Teoretické filtrování spektra.....	36
4.4.1 Způsob filtrování ve směru kolmém na směr letu.....	41
4.4.2 Způsob filtrování ve směru azimutu.....	41
4.5 Zdůvodnění potřeby filtrování v obou směrech.....	44
5. Analýza vlivu filtrace spektra.....	46
5.1 DORIS (Delft Object Oriented Interferometric Software).....	46
5.1.1 Stručný popis zpracování dvou snímků.....	47
5.2 Výběr snímků a oblasti pro analýzu filtrace.....	49
5.3 Vybrané interferometrické páry.....	52
5.3.1 Interferometrický pár 43468 - 23795 (oblast A).....	52
5.3.2 Interferometrický pár 23294 - 43468 (oblast A).....	55
5.3.3 Interferometrický pár 14777 - 15278 (oblast A).....	58
5.3.4 Interferometrický pár 17282 - 14777 (oblast A).....	61
5.3.5 Interferometrický pár 43468 - 26300 (oblast B).....	64
5.3.6 Interferometrický pár 09767 - 12773 (oblast B).....	67
5.4 Vyhodnocení zpracování interferometrických párů.....	70



6. Závěr.....	72
Použité symboly.....	73
Anglicko - český slovník použitých termínů a zkratk.....	75
Použitá literatura.....	83

## Poděkování

Děkuji svým rodičům za všestrannou pomoc a podporu během celého mého života a zvláště v době studia, vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Leně Halounové, CSc., konzultantům Ing. Ivaně Hlaváčové a Mgr. Jánů Kianičkovi za rady, věcné připomínky a možnost pracovat na tak zajímavém tématu.

## 1. Úvod

Radarová interferometrie je metodou dálkového průzkumu Země a používá se pro získání třírozměrné informace o zemském povrchu. V případě použití radaru se syntetickou aperturou (SAR) se pro vytvoření výškového modelu a deformačních map používá fázová složka komplexního radarového signálu.

Aplikaci radaru se syntetickou aperturou pro topografické mapování poprvé představil R. Graham ve své práci "*Synthetic interferometer radar for topographic mapping*" v roce 1974 [4] a poprvé byla použita pro průzkum povrchu Venuše, Měsíce a pro mapování zemského povrchu pomocí družice SEASAT v roce 1978. Nicméně teprve pozdější výzkumy plně prokázaly jeho potenciál.

Roku 1978 byla vypuštěna družice SEASAT, která jako první měla radar se syntetickou aperturou. Radarem pořízená zobrazení (v textu bude používán pojem "snímek"<sup>1</sup>) byla využita pro ověření dosavadních teorií o interferometrii [37]. Teprve po startu družice ERS-1 v roce 1991 byly snímky dány k dispozici i veřejnosti a začaly vznikat různé výzkumné skupiny (například DEOS na Technické univerzitě v Delftu v Holandsku), které se zabývaly dalšími potenciálními aplikacemi.

Dnes je už všeobecně uznáváno, že technologie radaru se syntetickou aperturou je vhodná pro mapování zemského povrchu, povrchových posunů vlivem zemětřesení, poddolování, vulkanické činnosti, zaplavených oblastí či pro klasifikaci vegetativních porostů [6], [7], [10], [38].

### 1.1 Popis problému a cíl práce

Pokud je k dispozici více snímků z radaru se syntetickou aperturou stejného území, je možné pro jednotlivé dvojice snímků vypočítat interferogram (fázové rozdíly dvou radarových signálů). Pro získání kvalitního interferogramu je potřeba, aby vlastnosti zpětných odrazů od povrchu Země byly co možno nejpodobnější. Díky tomu je pak mezi snímky dostatečně vysoká korelace. Jestliže časový interval mezi pořízením dvou snímků je velký (dny, měsíce, roky), dochází mezi snímky ke snížení korelace, a kvalita interferogramu se zhoršuje.

Další příčinou snížení korelace je vliv geometrie snímání při pořizování snímků. Jelikož zemský povrch je snímán ze dvou různých pozic družice, odrazové vlastnosti povrchu na jednotlivých snímcích jsou mírně odlišné. To má za následek vzájemné

---

<sup>1</sup> Označení není technicky správné, ale v tomto případě je výstižné.

posunutí spekter ve směru kolmém na směr letu. Na snímkování povrchu dále působí vnější vlivy, například rotace Země, inklinace orbity, manévrovací pohyby družice. Díky tomu osa vyslaného radarového svazku není přesně kolmá na vektor rychlosti letu družice a dochází k posunutí spektra ve směru letu.

Vlivem těchto posunů spekter pak dochází k tomu, že určitá část spektra jednoho snímku se nenachází ve spektru druhého snímku, což má za následek zašumění interferogramu. Proto je potřeba provést filtrování spektra a odstranit tyto části, které nejsou společné pro oba snímky.

Cílem této práce je teoreticky zpracovat a zdůvodnit filtrování radarového obrazu ve směru letu (směr azimutu) a směru kolmém na směr letu (směr range) při interferometrickém zpracování, a pomocí softwaru DORIS se pokusit uvedenou teorii prokázat na snímcích z družic ERS-1/2. Snímky jsou pořízeny v časovém rozpětí od roku 1996 až do roku 2004 a zabírají severozápadní oblast České republiky a přilehlou část Spolkové republiky Německo. V této práci se pokusím objasnit následující body:

- Teoretické zdůvodnění rozdílu ve frekvencích mezi oběma snímky ve směru azimutu i ve směru kolmém na směr letu (směr range)
- Zdůvodnění nutnosti filtrace v obou směrech
- Vliv různých parametrů filtrace na kvalitu interferogramu (ověření na několika interferogramech)

## 1.2 Struktura práce

V kapitole 1 je krátký úvod do problému a nástin bodů řešení práce. V kapitole 2 jsou probrány základní informace o radarech, princip Dopplerova efektu frekvenčních posunů, informace o družicích s radarem se syntetickou aperturou a podrobnější popis družic ERS-1/2 (European Remote Sensing Satellite). V kapitole 3 je rozebrán princip radarové interferometrie, konfigurace a metody snímání, zobrazení radaru se syntetickou aperturou, tvorba interferogramu a jeho přesnost. V kapitole 4 je probrán vznik frekvenčního posunu spekter, teoretická aplikace filtrování spektra a zdůvodnění potřeby filtrování. V kapitole 5 je pomocí programu DORIS (Delft Object Oriented Interferometric Software) provedeno testování filtrace spektra a zhodnocení dosažených výsledků. V kapitole 6 je závěr práce. Součástí práce je seznam použitých symbolů, anglicko - český slovník s definicemi pojmů a zkratk a seznam použité literatury.

## 2. Základní informace o radarech

V této kapitole je probrán základní princip radaru, jeho výhody a nevýhody a použití pro mapování. Nejdůležitější částí je seznámení s radarem se syntetickou aperturou (SAR), a principem Dopplerova efektu frekvenčních posunů. Na závěr jsou uvedeny družice s radarem se syntetickou aperturou, konkrétně družice ERS-1/2.

### 2.1 Princip radaru

Slovo *RADAR* vzniklo zkrácením anglického výrazu "*Radio Detection And Ranging*", v překladu dle [11] "*Rádiové odhalování (předmětů) a určování (jejich) vzdálenosti*".

Radar je zařízení, které vysílá vlnové záření a přijímá jeho odraz od cíle (v tomto případě povrchu Země) se současným měřením časového intervalu. Pomocí těchto údajů zjišťuje předměty na povrchu, měří jejich vzdálenosti, případně polohy. Jelikož používá k ozařování cíle svůj vlastní zdroj energie, snímání terénu není ovlivněno denní dobou a je označován jako *aktivní radar*.

Radary pracují s *mikrovlnným zářením*, což je interval spektra o vlnové délce  $\lambda = 1 \text{ m}$  až  $\lambda = 1 \text{ mm}$ . Podle velikosti vlnové délky je mikrovlnné záření schopno procházet skrz déšť, oblačnost, sníh, popřípadě i do určité hloubky povrchu či skrz vegetaci. Používané frekvence jsou "radarové službě" přidělena frekvenčním plánem (národní kmitočtové tabulky) v rozmezí od několika desítek MHz do několika desítek GHz (tabulka 2.1). Volba použité frekvence souvisí s akceptovatelnými rozměry antény a požadovaným dosahem.

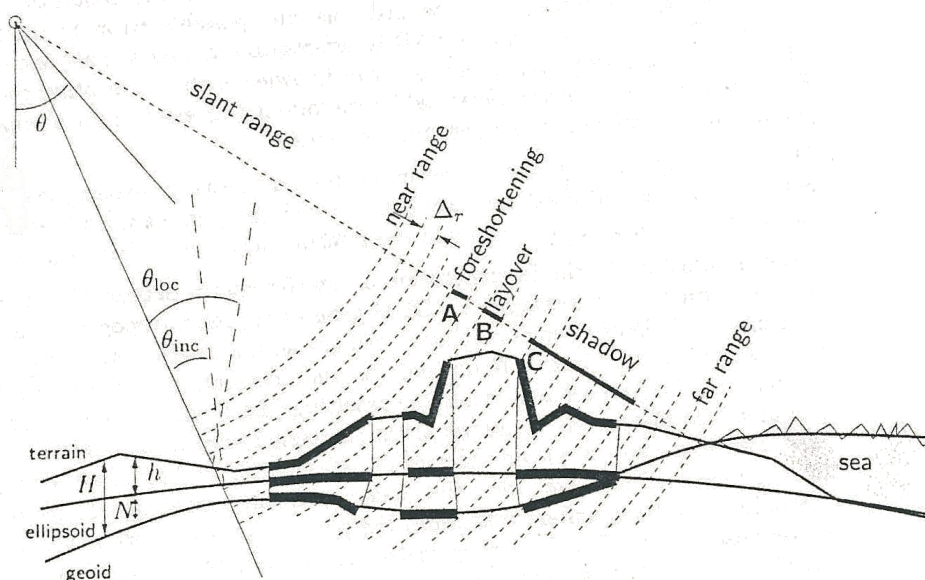
<b>Pásmo</b>	<b>Nominální rozsah frekvencí pásma</b>	<b>Některá pásma přidělená radar. službou (region 1 - Evropa)</b>
L	1 GHz - 2 GHz	1,625 GHz - 1,635 GHz
S	2 GHz - 4 GHz	2,3 GHz - 2,5 GHz; 2,7 GHz - 3,6 GHz
C	4 GHz - 8 GHz	5,25 GHz - 5,85 GHz
X	8 GHz - 12 GHz	8,50 GHz - 10,68 GHz

Tabulka 2.1: Přehled některých pásem dle [11].

Radar vysílá pulsy elektromagnetického vlnění v krátkých časových impulsích s opakovací frekvencí *PRF* (*pulse repetition frequency*) šikmo k povrchu a registruje velikost intenzity a dobu příchodu odraženého záření. Z celkových časů a amplitudy odraženého signálu (záření) od cílů na povrchu se dají vypočítat vzdálenosti k jednotlivým cílům, a vytvořit tak přibližný 2D obraz snímané oblasti, tak jak radar přelétává nad zájmovým územím.

Velikost intenzity odraženého záření závisí na vlastnostech povrchu (obsah vody, dielektrické vlastnosti povrchu) a topografii, tj. drsnosti povrchu. Čím je povrch hladší, tím více záření se odráží pryč od radaru a pixel v obrazu má tmavší odstín (například klidná vodní hladina), zatímco světlá místa na radarových snímcích představují vysokou intenzitu odraženého záření směrem k radaru (například města). Na základě kódování do určitého počtu stupňů šedi se pak tyto veličiny převádí do formy obrazu, tudíž tento radar se též nazývá *zobrazující radar*.

Vlivem šikmého snímání povrchu jsou vysoké terénní objekty na snímku nakloněné k senzoru. Z tohoto důvodu se na snímcích vyskytují jevy *zhuštění obrazu* (*foreshortening*), *překrytí* (*layover*) a *stín* (*shadow*) (obrázek 2.1). Tyto jevy jsou nejvýraznější zejména v horských oblastech [21], [23], [25].



Obrázek 2.1 - Radarové odezvy jsou zaznamenány mezi soustředné kružnicové oblouky. Rozlišovací buňka  $\Delta r$  ve směru kolmém na směr letu je definována rozstupem soustředných kružnic. Oblast **A** vyznačuje *zhuštění* (*foreshortening*), **B** vyznačuje *překrytí* (*layover*) a **C** vyznačuje *stín* (*shadow*) (obrázek převzat z [23]).

*Zhuštění (foreshortening)* se vyznačuje tím, že sklon svahů se blíží tvaru soustředné kružnice, a proto se strana směřující k senzoru jeví ve zkrácené délce. K maximu přijaté intenzity na minimální počet pixelů dochází tehdy, když sklon svahu je kolmý k radarovému paprsku. V tomto případě zhuštění se lokální úhel dopadu  $\theta_{loc}$  blíží k nule. Se vzrůstajícím úhlem dopadu dochází k redukování jevu a úplná eliminace nastane v okamžiku, kdy lokální úhel dopadu je roven  $90^\circ$ .

Naopak *překrytí (layover)* se vyskytuje tehdy, pokud sklon svahu je roven nebo dokonce převyšuje úhel pohledu  $\theta$ . Zobrazení pak obsahuje signál ze dvou míst, která mají stejnou vzdálenost od radaru, ale leží v určité vzdálenosti od sebe. Na těchto místech pak dochází k součtu signálu z většího počtu míst a výsledkem jsou vysoké hodnoty intenzity. Například při zobrazení vysokých vrcholů se stává, že vrcholek může být zobrazen dříve, než bod nacházející se na úpatí.

Posledním extrémem ve snímku je *stín (shadow)*. Ten se vyskytuje v místech, kde je nulový odraz, tj. zastíněná místa za vysokými terénními útvary.

## 2.2 Radar se syntetickou aperturou

V současné době se pro mapování používá *radar se syntetickou aperturou SAR* (*synthetic aperture radar*), který způsobem měření a zpracování docílí efektu velmi dlouhé antény, což vede ke zlepšení rozlišovací schopnosti. Technické detaily o tom, jak SAR pracuje, vychází z fyziky a radarového inženýrství. Důležité však je, že kromě amplitudy (tj. intenzity odrazu) detekuje i fázi odraženého záření. Z tohoto důvodu se tento typ zobrazujícího radaru nazývá *koherentní radar*.

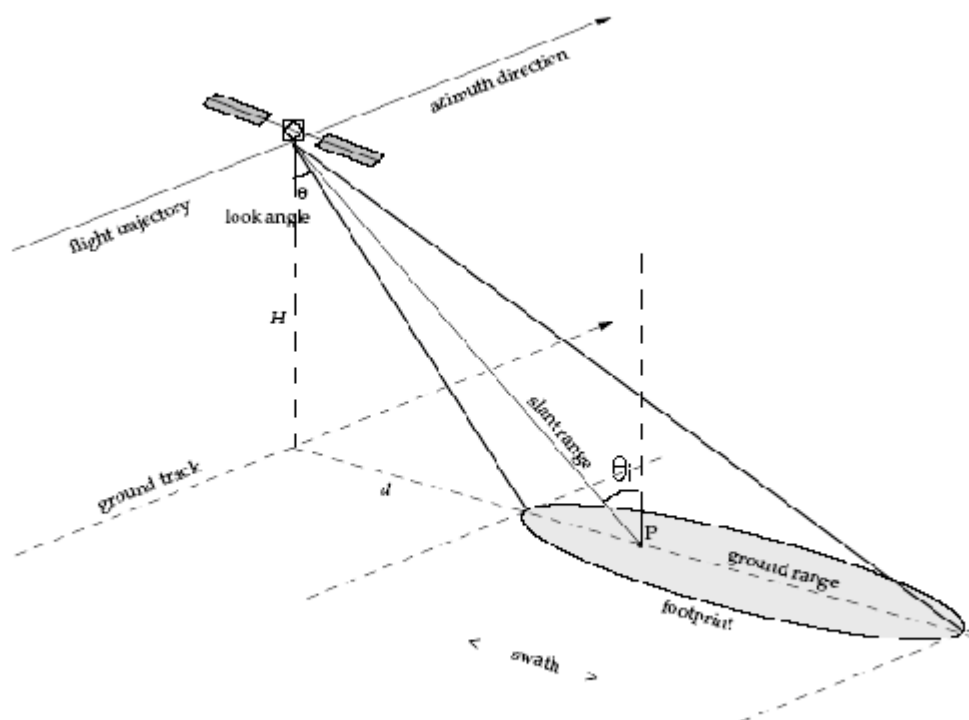
Základní myšlenkou koherentního radaru je porovnání fáze vyslaného impulsu s fází přijatého impulsu po odrazu od zemského povrchu. Zatímco detekovaná amplituda přijatého signálu je použita pro zobrazení odrazivosti povrchu (obrazové znázornění), detekovaná fáze souvisí se vzdáleností radaru a bodu na povrchu (pro model terénu a deformační mapování).

$$D = n \cdot \lambda + \varphi \cdot \frac{\lambda}{2\pi}, \quad (2.1)$$

kde  $D$  je vzdálenost od radaru k bodu na povrchu,  $n$  je počet opakování celého rozsahu  $2\pi$  vlnové délky  $\lambda$  a  $\varphi$  je fáze přijatého signálu.

Radar, umístěný na družici ve výšce  $H$  (obrázek 2.2), směřuje anténu k zemskému povrchu v rovině kolmé na směr letu (při zanedbání dalších vlivů, jako např. zemská rotace). Snímky se však nepořizují kolmo k zemskému povrchu, ale pod určitým *úhlem pohledu*  $\theta$  (*look angle*), protože při snímání kolmo pod nosičem by docházelo prakticky ve všech případech k jevu překrytí (*layover*). Paprsek dopadá pod *úhlem dopadu*  $\theta_i$  (*incidence angle*) a je závislý na topografii. Vzdálenost mezi družicí a povrchem ve směru vyslání signálu se nazývá *vzdálenost v šikmém pohledu* (*slant range*), jeho promítnutí do nulové hladiny definuje *vzdálenost ve směru kolmém na směr letu* (*ground range*) a směr rovnoběžný s dráhou družice je *směr letu* (*azimuth direction*). Napravo ve vzdálenosti  $d$  od *projekce letové dráhy na povrch* (*ground track*) začíná snímaný pás, nazývaný se *šířka záběru* (*swath*) a místo na povrchu, které je ozářeno jedním vyslaným pulsem, se nazývá *stopa antény* (*antenna footprint*).





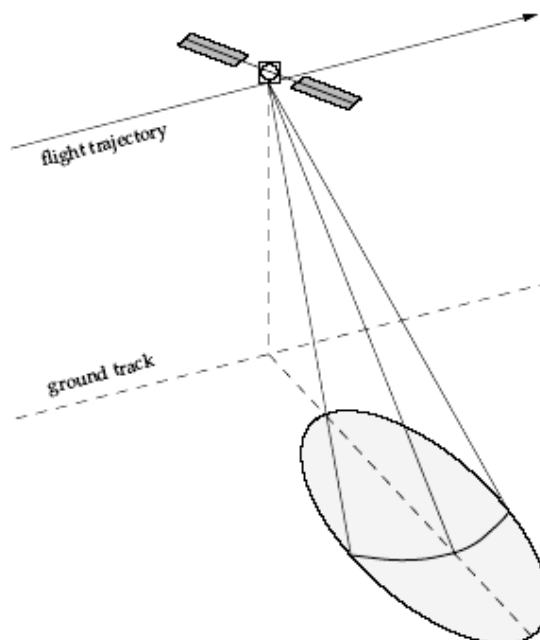
Obrázek 2.2: Snímací geometrie bočního radaru (*side-looking radar*) (obrázek převzat z [26]).

### 2.3 Princip Dopplerova efektu frekvenčních posunů

Pro zlepšení azimutové rozlišovací schopnosti se aplikuje *Dopplerovo zpracování signálů*, jenž se v klasické radarové technice používá k určení rychlosti pohybu pozorovaných objektů.

Dopplerův frekvenční posun je změna frekvence signálu v závislosti na relativních rychlostech vysílače a odražeče - rychlost signálu od odražeče se skládá s rychlostí nosiče podle vektorové geometrie, a tím vzniká posun ve frekvenci přijatého signálu. Rozdíl fází vyslaného a přijatého signálu závisí na okamžité vzdálenosti předmětu k radaru, takže radiální pohyb předmětu vůči radaru se projeví změnami tohoto rozdílu fází v čase. Derivací okamžité fáze podle času je získán Dopplerův kmitočtový posun [11]. Tyto změny dokáže vyhodnotit pouze radar s koherentním systémem zpracování signálu.

Během časového intervalu, v němž je objekt ozářen radarem pohybujícím se rychlostí  $v$  vysláním pulsu o určité šířce svazku, dopadne zpět na anténu od něj řada pulsních odrazů. První nastane v okamžiku, kdy na objekt dopadne paprsek tvořící přední hranu svazku a poslední bude odraz od zadní hrany svazku.



Obrázek 2.3: Objekty ležící v oblasti *stopy antény* ve vyznačeném kružnicovém oblouku jsou ve stejné vzdálenosti od senzoru a nemohou být od sebe rozlišeny na základě časového zpoždění. Jelikož složka rychlosti satelitu ve směru pohledu je pro každý bod jiná, mohou být od sebe rozlišeny na základě Dopplerova posunu. (Obrázek převzat z [26]).

Jak lze vidět na obrázku 2.3, pokud mají objekty stejnou vzdálenost od radaru, není možné je od sebe odlišit na základě časového zpoždění. Složka rychlosti satelitu ve směru pohledu je však různá, a proto se ve frekvenci odraženého signálu vyskytuje různý Dopplerův posun, jehož velikost závisí na pozici objektu vůči satelitu. Na základě tohoto Dopplerova posunu lze rozlišit objekty nacházející se ve stejné vzdálenosti v oblasti ozářené vyslaným paprskem. První odraz od objektu z plochy před družicí bude vykazovat kladný Dopplerův posun k vyšším frekvencím (nosič se k nim přibližuje). Posun se bude postupně zmenšovat, nulový nastane v okamžiku, kdy vzdálenost objektu od satelitu bude minimální, tj. spojnice družice – odrazeč je kolmá na vektor rychlosti družice vůči zemskému povrchu. Signály od objektů z plochy za nosičem budou mít nižší frekvence než vysílané záření (nosič se od nich vzdaluje), tedy záporný Dopplerův posun. Odrazy z plochy blízké ose paprsku antény nevykazují téměř žádný posun frekvencí. To je kritérium pro zaznamenávání signálu a jeho další zpracování. Je nutné si uvědomit, že na tento proces působí vnější vlivy, tj. rotace Země, inklinace orbity a topografie. Díky tomu osa vyslaného radarového svazku není přesně kolmá na vektor rychlosti letu družice, ale posunutá o úhel  $\psi$ , vyjadřující *úhlovou odchylku vyzařování (squint angle)*, a směřuje tak do bodu tzv. *Dopplerova centroidu*. Možné způsoby určení Dopplerova centroidu jsou naznačeny v [12], [23], [26], [27].

## 2.4 Družice s radarem se syntetickou aperturou

Družice	ERS-1	ERS-2	JERS-1	RADARSAT	ENVISAT
Provozovatel	ESA	ESA	Japonsko	Kanada	ESA
Datum startu	16.8.1991	20.4.1995	únor 1992	4.11.1995	1.3.2002
Spektrální pásmo	C	C	L	C	C
Vlnová délka	5,6 cm	5,6 cm	23,5 cm	5,7 cm	5,6 cm
Frekvence	5,25 GHz	5,25 GHz	1,275 GHz	5,3 GHz	5,33 GHz
Polarizace	VV	VV	HH	HH	H a V <sup>2</sup>
Úhel pohledu	23°	23°	38°	20°- 59°	15°- 45°
Šířka záběru [km]	100	100	75	45 - 500	60 - 405
Měření od směru letu	vpravo	vpravo	vpravo	vpravo	vpravo
Rozlišení snímku [m]	25	25	25	10 - 100	30 - 1000
Termínové rozlišení	35 dní	35 dní	44 dní	1 - 5 dní	35 dní

Tabulka 2.2: Základní parametry družic s radarem se syntetickou aperturou.

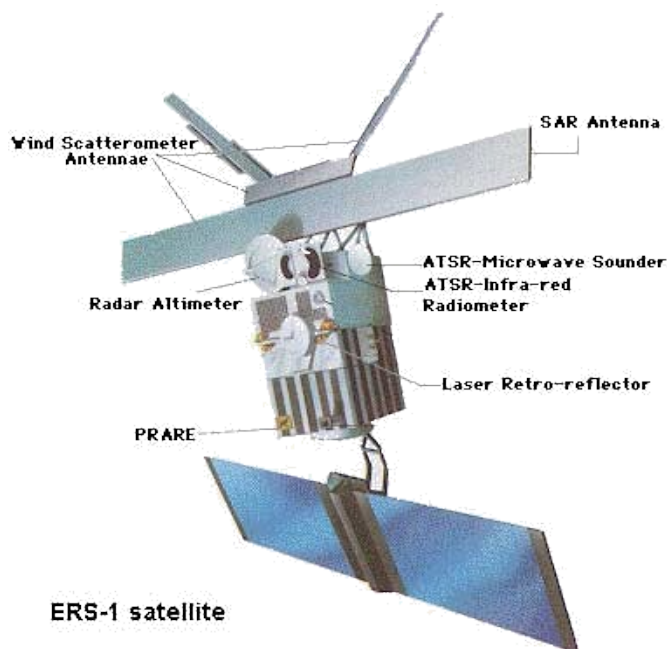
Vedle těchto družic byl v rámci interferometrických výpočtů digitálního modelu povrchu (DMP) vyslán v roce 1999 na oběžnou dráhu i raketoplán v rámci mise Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). V rámci této mise se podařilo zmapovat a vytvořit homogenní DMP pro 80 % povrchu zeměkoule. Na rozdíl od zmíněných družic měl dvě antény, přičemž první sloužila jako vysílač i přijímač a druhá jen jako přijímač. Díky tomu časový rozdíl mezi dvěma snímky a vliv vegetace či rozdílného počasí byl minimální.

Bližší informace ohledně ERS a ENVISAT lze nalézt například na [14], [15], ohledně RADARSAT na [16] a v případě JERS-1 na [17]. Informace o dalších satelitech (vysílajících v dalších spektrálních pásmech) jsou na [18].

<sup>2</sup> Satelit ENVISAT umožňuje tyto kombinace vysílané a přijímané polarizace: HH nebo VV nebo HH + VV nebo HH + HV nebo VV + VH, kde H je označení pro horizontální polarizaci a V je označení pro vertikální polarizaci. Polarizaci určuje směr vektoru intenzity elektrického pole k rovině dopadu.

### 2.4.1 European Remote Sensing Satellite (ERS-1/2)

Pro diplomovou práci byla k dispozici data z družic ERS-1/2. ERS jsou družice pro DPZ, specializované na mikrovlnnou oblast. Díky laserové a radarové (v případě ERS-2) lokaci mají přesně známou a řízenou dráhu ve výšce 785 km.



Obrázek 2.4: Družice ERS-1/2 - měřicí aparatury (převzato z [15]).

Účelně je zaměřena na sledování oceánu, rychlosti větru, velikosti sněhové a ledové pokrývky. Pro tyto účely se proto na družici nachází *Active Microwave Instrumentation (AMI)*, *Radar Altimeter (RA)*, *Along Track Scanning Radiometer (ATSR)*. V případě družice ERS-2 zde přibýly *Global Ozone Monitoring Experiment (GOME)* a *ATSR-2* (obrázek 2.4).

AMI se skládá z radaru se syntetickou aperturou (*SAR*) a *rozptyloměru (scatterometer)* pro určení charakteristik větru. Rozměry radarové antény jsou 10x1 m a anténa umožňuje průzkum i při vysoké oblačnosti. Má tři módy: *SAR Image* (zobrazující radar), *SAR Wave* (měření radarové odrazivosti oceánu a odvození výšky, délky a směru vln) a *Wind Scatterometer* (nezobrazující mód k měření rychlosti a směru větru).

RA slouží k určení přesné vzdálenosti "družice - povrch" pro odvození tvaru geoidu, případně typu a tloušťky ledu. Dráha družice je určována pomocí laserové lokace a pomocí mikrovlnného systému *PRARE (Precision Range And Range-rate Equipment)* v případě družice ERS-2.

ATSR se skládá z infračerveného radiometru *IRR (IR Radiometer)* a zařízení pro mikrovlnnou sondáž *MWS (Microwave Sounder)*.

Jelikož radar se syntetickou aperturou, umístěný na družicích ERS, byl původně navržen na sledování oceanografie, byl zde uvažován velmi malý úhel dopadu. V případě povrchu bez topografie má úhel dopadu, uprostřed snímaného pásu, průměrnou hodnotu  $23^\circ$  a okraje stopy mají mezní hodnoty  $19, 35^\circ$  a  $26,50^\circ$ . Pokud tedy terén má sklon větší než  $20^\circ$ , není možné ho zmapovat, protože se na snímku vyskytuje překrytí (layover) (obrázek 2.1).

Mise ERS-1 byla oficiálně ukončena v roce 1996, přičemž satelit byl převeden do hibernace a bylo možné ho znovu reaktivovat pro případ *TANDEM mise* (například v případě erupce vulkánu pod ledovcem Vatnajökull na Islandu v roce 1996 [25]). V současné době je už mimo provoz. Pro pokračování programu ERS byl v roce 1995 vypuštěn satelit ERS-2, který má stejné orbitální parametry a vlastnosti jako ERS-1.

V době, kdy oba satelity byly aktivní, se jednalo o *TANDEM mise*, během kterých ERS-2 sledoval ERS-1 po stejné orbitě s jednodenním zpožděním, a snímaly tak stejné území pod stejným úhlem pohledu. Virtuální základna mezi oběma satelity byla velmi stabilní, jelikož na oba dva satelity působily stejné rušivé síly. Výhodou ERS-1/2 tandem snímků bylo, že interferogramy vykazovaly mnohem vyšší korelaci díky jednodenní časové základně oproti interferogramům s delší časovou základnou.

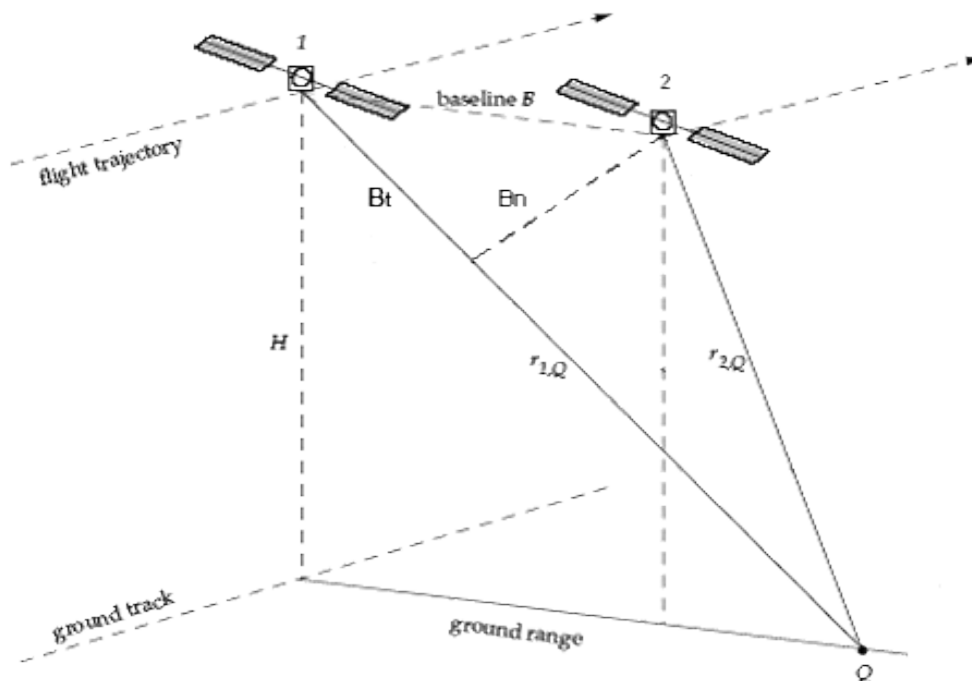
### 3. Princip radarové interferometrie

*Radarová interferometrie (radar interferometry)* je metoda snímání a zpracování radarových snímků na základě rozdílů ve fázi dvou radarových komplexních signálů získaných z odlišné pozice radaru. Výsledkem je pak topografická mapa (ve 2D), nebo v případě *diferenciální radarové interferometrie (differential interferometry)* je výsledkem deformační mapa. Deformační mapy jsou využívány pro detekci sesuvů, zemětřesení či vulkanických pohybů. Tyto změny zemského povrchu lze však měřit pouze ve směru vyslaného signálu, tj. v šikmém směru.

#### 3.1 Základní geometrie

Pro interferometrické zpracování jsou potřebné alespoň dvě scény stejného snímaného území, tzv. *snímek hlavní (master)* a *vedlejší (slave)* (obrázek 3.1). Veškeré zpracování a výsledky jsou pak vztaženy k hlavnímu snímku. Vzdálenost mezi těmito radary v okamžiku snímkování se nazývá *interferometrická základna  $B$  (interferometric baseline)*. Tato základna je vždy v rovině kolmé ke směru dráhy družice (vztaženo k družici, ze které je pořízený hlavní snímek). Pokud však dráhy nejsou přesně rovnoběžné, může nabývat různé hodnoty v jednotlivých místech snímku. Tuto základnu lze vektorově rozložit na dvě složky, a to na *kolmou základnu  $B_n$  (perpendicular baseline)* a *tečnou základnu  $B_t$  (parallel baseline)* k radarovému paprsku vyslanému v šikmém pohledu. Kolmá základna bude nabývat kladné hodnoty, pokud družice, pořizující vedlejší snímek, bude napravo od směru vysílání paprsku družicí, pořizující hlavní snímek. Interferometrická základna se dá dále definovat pomocí horizontální základny ( $B_h$ ) a vertikální základny ( $B_v$ ), popřípadě pomocí délky základny a orientačního úhlu. Jednotlivé parametry, definující interferometrickou základnu, je možno mezi sebou navzájem převádět pomocí goniometrických vztahů [20],[36].

Dále se definuje *časová základna  $B_{Temp}$  (temporal baseline)*, tj. časový okamžik mezi dvěma expozicemi. Pokud je časová základna velmi dlouhá, tj. mezi pořízením prvního a druhého snímku uplynula delší doba, na zobrazeném povrchu mohlo dojít ke změnám, (například jarní a zimní měření), a výsledkem je *nízká korelace (vysoká dekorelace)* mezi snímky. Zatímco zastavěné plochy jsou v tomto případě nejstabilnější, zemědělské plochy mohou být dekorelovány v závislosti na vegetačním období a vodní plochy v jakémkoli okamžiku dle aktuálního počasí (například vítr).



Obrázek 3.1: Vzdálenost mezi družicemi v okamžiku snímkování se nazývá *interferometrická základna B* (*interferometer baseline*). Tato základna je vždy v rovině kolmé ke směru dráhy družice, pořizující hlavní snímek. Tuto základnu lze vektorově rozložit na dvě složky, a to na *kolmou základnu  $B_n$*  (*perpendicular baseline*) a *tečnou základnu  $B_t$*  (*parallel baseline*) k radarovému paprsku vyslaného v šikmém pohledu. (Obrázek převzat z [26]).

### 3.1.1 Konfigurace a metody radarové interferometrie

Ideální SAR interferometr se skládá ze dvou antén vzdálených o pevnou vzdálenost (interferometrická základna). Obě antény měří odražené signály vyslané jediným vysílačem (např. jednou z antén). V případě družicových nosičů však byl problém, že družice byla vždy unikátní, tj. chyběla druhá anténa pro přímé měření. Proto se provádí druhé samostatné měření, které nahrazuje tuto druhou anténu.

Možné konfigurace měřících systémů:

- snímání jedním radarem na stejné družici ze stejné dráhy (časový interval 35 dní)
- snímání dvěma radary pomocí dvou družic ze stejné dráhy (tandem ERS-1/2)
- snímání jedním radarem se dvěma přijímacími anténami, umístěnými ve známé vzdálenosti od sebe (mise SRTM)

Na základě výše vyjmenovaných konfigurací se rozeznávají dvě základní metody.

- *jednoobletová interferometrie (single-pass interferometry)*

Zaznamenává oba snímky současně použitím vysílací/přijímací antény a druhé přijímací antény, které jsou od sebe v určité vzdálenosti. Tato metoda je omezena velikostí základny, ale díky tomu, měření není ovlivněno změnami podmínek mezi pořízením jednotlivých snímků. Příkladem této metody je Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

- *víceobletová interferometrie (repeat-pass interferometry)*

Používá snímky z různých časových období. Tato metoda se dá ještě podrobněji specifikovat:

- *dvouobletová interferometrie (two - pass interferometry)*

Pomocí dvou snímků zájmového území vytvoříme interferogram. Na základě interferogramu lze vytvořit výškový model terénu, za předpokladu, že se nevyskytly deformace. Pokud od tohoto interferogramu je odečten externí digitální model povrchu, je možné získat deformační mapu území.

- *trojobletová interferometrie (three - pass interferometry)*

K dispozici jsou tři snímky stejného území, přičemž jeden je uvažován jako hlavní snímek a zbývající vedlejší snímky jsou k němu připojeny. Z 1. a 2. přeletu se vypočte interferogram (volí se krátká časová základna a dlouhá kolmá základna, aby vynikla topografie), z 2. a 3. přeletu se také vypočte interferogram (volí se dlouhá časová základna a kolmá základna co možno nejmenší, aby se projevíly polohové změny terénu) tak, aby oba dva interferometrické páry měly společný hlavní snímek (2. přelet). Jejich odečtením se vyloučí vliv topografie a z diferenčního interferogramu pak je možné posuzovat změny v terénu, ke kterým došlo v době mezi pořízením jednotlivých snímků.

Jelikož kromě mise SRTM neexistuje žádný další případ jednoobletové interferometrie, veškeré uvedené informace se týkají víceobletové interferometrie.



### 3.1.2 Zobrazení radaru se syntetickou aperturou

Koherentně detekované obrazy se zapisují řádek po řádku (řádkové uspořádání ve směru azimutu) a vytvářejí tak binární soubor, který se nazývá *SAR raw data*. Pro proces tvoření obrazu se používají termíny *SAR processing* či *focusing*.

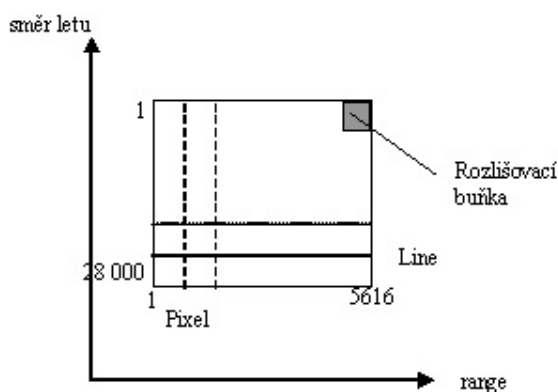
Každý pixel *zobrazení SAR (SAR image)*, tj. snímku, obsahuje informace o intenzitě (amplituda) a fázi odraženého záření. Intenzita pixelu je vázána především k odrazovým vlastnostem povrchu a fáze především ke vzdálenosti. Právě fáze je užívána pro radarovou interferometrii.

#### *Složka amplitudová*

Obsahuje informaci o intenzitě odraženého záření od předmětu k radaru. Intenzita odraženého záření je ovlivněna fyzikálními vlastnostmi povrchu, vlhkostí apod., tj. polohopisně mapuje povrch. Exponovaná skála a urbanistické oblasti vykazují výraznou amplitudu (světlý pixel) díky principu koutového odražeče, zatímco hladký, rovný povrch, např. klidná vodní hladina, vyazuje nízkou amplitudu (tmavý pixel). Důvodem nízké amplitudy odraženého záření je princip zrcadlového odrazu, kdy se záření odráží od radaru, a k radaru se tak vrátí minimum odraženého záření. Z toho plyne, že intenzita odrazu závisí víc na drsnosti povrchu než na jeho chemických vlastnostech.

#### *Složka fázová*

Zahrnuje informaci o fázi (fázovém posunu) odraženého záření. Jelikož signál má sinusoidní lineárně modulovaný charakter, fázový posun je ekvivalentní fázovému rozdílu mezi vyslaným a přijatým signálem v rozsahu  $<0, 2\pi$ ). Fázový rozdíl je dvojnásobný, jelikož se jedná o cestu k povrchu a zpět. Z tohoto důvodu je třeba uvažovat jen poloviční hodnotu fázového posunu.



Obrázek 3.2: Uspořádání řádků a sloupců v obrazových datech v případě družic ERS-1/2.

Snímek se skládá ze sloupců a řádků, které vytvářejí jednotlivé *rozlišovací buňky* (*resolution cell*). Pro směr letu se používá termín *line*, tj. řada pixelů se stejným azimutem a měnící se souřadnicí ve směru range. Pro směr kolmý na směr letu (range) je použit termín *pixel* (obrázek 3.2). Je nutno si však ujasnit, že i pro jednotlivou rozlišovací buňku je používán termín pixel. Správný smysl tohoto termínu je potřeba správně zjistit z kontextu. Umístění a rozměr rozlišovací buňky v osách azimutu a slant-range závisí jen na charakteru radarového systému. V případě radarů ERS má buňka rozměr 4,5 m ve směru letu a 9,5 m v šikmém směru. Vzdálenost mezi sousedními buňkami je 4 m ve směru letu a 8 m v šikmém směru, což znamená, že buňky mají mírný překryt v obou směrech.

Jelikož v rozměrech ve směru letu a ve směru kolmém je velký rozdíl v rozlišení, obrazy bývají často upraveny pomocí procesu *multilooking*, tj. určitý počet  $N$  pixelů se stejným azimutem se zprůměruje do jednoho pixelu o větší velikosti. Po této úpravě jsou rozměry v obou směrech přibližně stejné (rozlišení v obou směrech je nyní 20 - 30 m). Nejčastěji se používá poměr 1/5, tj. jeden pixel ve směru kolmém ku 5 pixelům ve směru letu).

Jak bylo uvedeno výše, každý pixel obsahuje informaci o amplitudě a fázi. V závislosti na velikosti amplitudy pak má pixel přiřazenu hodnotu na stupnici šedé škály. Pokud zde bude velká homogenní oblast povrchu (například pole se stejnou vegetací), bude se zde vyskytovat velké množství pixelů s různě velkými amplitudami (různá místa pole budou mít rozdílnou vlhkost, sklon listů apod.). Výsledná hodnota je dána součtem signálů z dílčích ploch buňky. Dílčí amplitudy a fázové posuny způsobí různorodé velikosti výsledné amplitudy pro blízké si typy ploch. Výsledkem je pak efekt *pepř a sůl* (*speckle*). Pokud bude k dispozici více snímků stejného území v různých časech nebo z různého pohledového úhlu a složí se (sečtení a zprůměrování), tento efekt bude redukován a zlepší se tak schopnost rozlišení detailů.

### 3.2 Tvorba interferogramu

Je-li k dispozici dvojice snímků z radaru se syntetickou aperturou po stejné území, tak ke každému pixelu je přiřazeno komplexní číslo  $P$ , které obsahuje amplitudu a fázi.

$$P = A \cdot e^{i\varphi} \quad (3.1)$$

kde  $A$  je amplituda komplexního čísla  $P$ ,  $\varphi$  je fáze komplexního čísla  $P$  a  $i$  je imaginární jednotka. Pomocí komplexně sdruženého násobení se vynásobí první snímek druhým (buňka po buňce).

*Komplexně sdružené násobení:*

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = A_1 \cdot e^{i\varphi_1} \\ P_2 = (A_2 \cdot e^{i\varphi_2})^* \end{array} \right\} P_1 \cdot P_2^* = |A_1| \cdot |A_2| \cdot e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} = |A_1| \cdot |A_2| \cdot e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} = I \quad (3.2)$$

Fáze komplexního interferogramu, tj. *interferometrická fáze*  $\Phi$  (*interferometric phase*) pak bude dána jako

$$\Phi = \arctan\left(\frac{\text{Im}(I)}{\text{Re}(I)}\right) = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (3.3)$$

Každé hodnotě fázového rozdílu  $\langle 0 ; 2\pi \rangle$  odpovídá v interferogramu určitá barva (určitý odstín barevného rozpětí). Sousední kontury stejné barvy, tzv. *interferenční proužky* (*interferometric fringes*), reprezentují fázový rozdíl  $2\pi$  neboli velikost vlnové délky vyslaného záření. Jelikož každá vlna je vysílána ze satelitu na povrch a pak zpět, fázová změna je dvojitá během časového úseku vyslání a příjmu vlny. Interferogram se dá přirovnat k vrstevnicovému plánu. Tam, kde je terén víceméně rovný, interferenční proužky mají velký rozestup a znázorňují nízkou výškovou změnu. Naopak zvýšení výškového rozdílu způsobuje zhuštění proužků. Rozestup proužků úzce souvisí s *frekvencí proužků* (*fringe frequency*), udávající počet frekvenčních proužků na pixel. Pokud rozestup klesá, frekvence proužků roste. Takto vytvořený interferogram však udává pouze relativní výšku vůči okolí.

Pokud dojde k odečtení dvou interferogramů stejného území, vypočte se *diferenční interferogram*, který udává relativní posuny vůči okolí. V ideálním případě, například v případě epicentra zemětřesení, se vyskytují kompletní interferenční proužky. Čím jsou si proužky bližší, tím je větší posun (deformace) povrchu. Ne vždy je

interferogram takto ideální. Většinou při sledování posunů se nevyskytují pravidelné interferenční proužky, ale pouze shluky barevných pixelů barevně se lišící od okolního prostředí. To naznačuje, že se zde může vyskytovat nějaký posun.

Čitelnost interferogramu úzce souvisí s velikostí kolmé základny mezi anténami. Pokud je kolmá základna krátká, tak interferogram je méně podrobný a výškově značně členitý terén je lépe čitelný (vhodné pro určování deformací povrchu). Naopak při dlouhé kolmé základně je interferogram velmi podrobný a jednotlivé interferenční proužky jsou hůře identifikovatelné (vhodné pro tvorbu digitálního modelu povrchu) [8].

Pokud se však překročí určitá mez velikosti kolmé základny, radarové signály budou mít nízkou korelaci, a interferogram tak ztratí svou interferometrickou informaci. Maximální možná základna je často popsána jako *kritická základna*  $B_{n,crit}$  (*critical baseline*).

$$B_{n,crit} = \frac{\lambda \cdot W \cdot R \cdot \tan(\theta - \alpha)}{v} \quad (3.4)$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka,  $W$  je šířka spektrálního pásma,  $R$  je vzdálenost družice od povrchu,  $\alpha$  je sklon terénu v daném místě a  $v$  je rychlost letu družice.

Výškový rozdíl, odpovídající změně interferometrické fáze o velikost  $2\pi$ , se nazývá *výškový cyklus*  $q_A$  (*height ambiguity*)<sup>3</sup> a dá se vypočítat z parametrů interferogramu (odvození je naznačeno v [9]).

$$q_A = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{R \cdot \sin \theta}{B_n} \quad (3.5)$$

kde  $q_A$  je výškový cyklus,  $B_n$  je kolmá základna,  $\theta$  je úhel pohledu a  $R$  je průměrná vzdálenost v šikmém směru uprostřed stopy antény (obrázek 3.3).

Číselný příklad pro ERS - 1/2:

$$\lambda = 56 \text{ mm}$$

$$\theta = 23^\circ$$

$$R = 850 \text{ km}$$

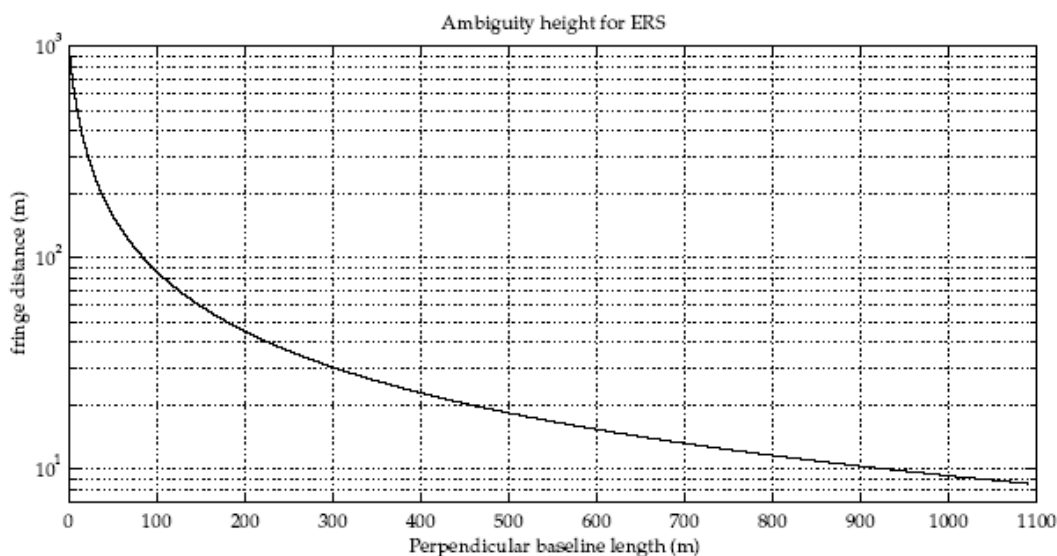
$$q_A = \frac{56 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \frac{850 \cdot 10^3 \cdot \sin 23}{B_n} = \frac{9300}{B_n} [\text{m}]$$

$$\text{Pro } B_n = 100 \text{ m} \Rightarrow q_A = 93 \text{ m}$$

$$B_n = 30 \text{ m} \Rightarrow q_A = 310 \text{ m}$$

<sup>3</sup> V radiolokaci i v [13] se pro tento termín používá překlad *míra neurčitosti*

Nesmí se však zapomenout na to, že se jedná pouze o přibližnou hodnotu, protože v průběhu snímku se mění kolmá základna  $B_n$ , úhel pohledu  $\theta$  a tudíž i vzdálenost  $R$  (například vlivem nerovnoběžnosti drah družic).



Obrázek 3.3: Znázornění výškového cyklu, tj. jak velký výškový rozdíl odpovídá změně interferometrické fáze o velikosti  $2\pi$ . Čím je kolmá základna delší, tím je interferogram podrobnější a frekvence interferenčních proužků větší. (Obrázek převzat z [26]).

V případě *diferenčního interferogramu*, tj. porovnání dvou interferogramů pro určení polohových změn terénu, odpovídá jeden interferenční proužek polovině vlnové délky vyslaného záření. Tzn. že v případě družic ERS se jedná o změnu polohy obrazového bodu ve směru pohledu o vzdálenost 2,8 cm.

Následující uvedené odvození předpokládá, že radarová data nejsou zatížena vnějšími rušivými vlivy, jako je například atmosférické zpoždění. Způsob snímání je znázorněn na obrázku 3.1, kde satelity, pořizující snímky povrchu Země, jsou na pozicích 1 a 2, vzdálenost mezi satelitem na pozici 1 a bodem Q ve směru pohledu je  $r_{1,Q}$  a fáze radarového signálu je

$$\varphi_{1,Q} = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot r_{1,Q} \quad (3.6)$$

Fáze odpovídající vzdálenosti mezi satelitem na pozici 2 a bodem Q je

$$\varphi_{2,Q} = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot r_{2,Q} \quad (3.7)$$

Fázový rozdíl obou komplexních SAR snímků je vypočten pixel po pixelu. Interferometrická fáze je pak dána rozdílem

$$\varphi_{1,Q} - \varphi_{2,Q} = \Phi_Q = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot (r_{1,Q} - r_{2,Q}) = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta r_Q \quad (3.8)$$

Podrobnější odvození pro změnu interferometrické fáze ve snímku můžeme nalézt například v [13], [22], [25], [26].

Abychom mohli vytvořit výškový model, je potřeba odstranit z interferogramu fázi referenčního elipsoidu  $\Phi_{ref}$  (*flat-earth phase*). Tato fáze odpovídá případu, kdy referenční těleso je bez topografie a interferogram by se pak skládal pouze z rovných interferenčních proužků rovnoběžných se směrem letu.

$$I = A_1 \cdot A_2 \cdot e^{i(\varphi_1 - \varphi_2 - \Phi_{ref})} \quad (3.9)$$

Interferogram nyní udává informaci o relativním výškovém členění terénu a interferometrická fáze je modulována v rozsahu  $2\pi$ . Proto je potřeba určitému počtu interferometrických proužků přiřadit odpovídající absolutní výškový rozdíl. Tento proces se nazývá *rozbalení fáze* (*phase unwrapping*). Pokud je známa výška jistého bodu, jeho fáze je brána jako počáteční stav, od kterého se sečtením interferometrických proužků a vynásobením výškovým cyklem  $q_A$  stanovují okolní výšky. Díky častému šumu v interferogramu je tento krok velmi komplikovaný. Jakmile je fáze interferogramu rozbalena, je k dispozici výšková mapa v šikmém zobrazení. Pokud chceme vytvořit digitální model terénu, musíme tuto výškovou mapu převést ze šikmé projekce do ortogonální a souřadnicově připojit do požadovaného zobrazení.

### 3.3 Diferenciální interferometrie

Jestliže vytváříme interferogram ze dvou SAR snímků, které jsou snímány ze stejné pozice, ale v různém časovém odstupu, může dojít ke změně vzdálenosti k objektu na základě změny v interferometrické fázi. Posun vyjádřený parametrem  $\delta r$  ve směru vysílání paprsku způsobuje *diferenční interferometrickou fázi (differential interferometric phase)*

$$\delta\Phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \delta r \quad (3.10)$$

Pokud byly k dispozici dva snímky, jejichž kolmá základna by byla blízká nule (snímání ze stejné družice na stejné pozici), změna interferometrické fáze v interferogramu by byla ovlivněna převážně deformačními změnami terénu, tj. případné změny interferometrické fáze by byly způsobeny i jen několikacentimetrovými posuny terénu.

Jelikož však v reálném případě je kolmá základna různá od nuly, změna interferometrické fáze je ovlivněna jak deformačními změnami, tak i topografií. Pro odstranění topografického vlivu je potřeba existující digitální model terénu (buď externí, nebo vypočtený z dostupného interferometrického páru). Tento digitální model terénu se převede na fázový interferogram a odečteme od původního interferogramu získaného z dvojice snímků. Ve zbytkové fázi zůstane pouze diferenční fáze způsobená deformací, popřípadě fázové zpoždění vlivem atmosféry.

Další možnost diferenční interferometrie je použití tří snímků, přičemž mezi prvními dvěma snímky nedošlo k polohovým změnám terénu. Jeden snímek se zvolí jako hlavní a ostatní dva snímky jsou k němu přidruženy jako vedlejší. Pro tvorbu prvního interferogramu se použije dvojice snímků s časovou základnou co možno nejmenší, aby byl eliminován vliv deformace a s kolmou základnou velkou, aby vliv topografie byl výrazný. Pro druhý interferogram se použije dvojice snímků (se stejným hlavním snímkem jako u předchozí dvojice) s delší časovou základnou, aby se projevil případné deformace, a s co možno nejmenší kolmou základnou. Následným odečtením těchto dvou interferogramů [13] je získán diferenční interferogram.

Určení deformace diferenční interferometrií je možné, pokud vlastnosti odrazečů zůstaly stejné během časového intervalu pořízení snímků. Tento požadavek však je často obtížné splnit, protože větší časový rozdíl mezi snímky snižuje korelaci

interferogramů, a zhoršuje tak schopnost rozhodnutí o deformaci [25]. Kromě toho dalším faktorem, který způsobuje nejasnosti při rozhodování o deformaci, je vliv atmosféry. Průběh tohoto vlivu na interferogram je většinou zhruba lineární v rámci celého snímku (pokud se nejedná o lokální bouře) a není možné ho ani na podkladě meteorologických informací odstranit.

### 3.4 Přesnost radarové interferometrie

Na základě [22] se dělí vlivy na přesnost interferometricky generovaného digitálního modelu povrchu na tři základní skupiny:

- přesnost určení fáze pixelu = fázový šum
- přesnost snímací geometrie = nepřesnost orbitálních parametrů
- stálost podmínek pro šíření paprsku = atmosférické vlivy

V případě topografického a deformačního mapování se snažíme, aby tyto vlivy byly eliminovány. Tzn. že při výběru snímku se snažíme vyhnout obdobím velkých dešťových přeháněk, či sněhových pokrývek.

Přesnost radarové interferometrie hodně závisí na kolmé základně mezi snímky. Čím menší bude kolmá základna, tím větší výškový rozdíl bude interferenční proužek představovat. Kdyby byla kolmá základna nulová, nedala by se ze vzniklého interferogramu vyčíst informace o topografii terénu a interferogram by pak představoval buď rušivý vliv především atmosféry, nebo samotné hodnoty posunu terénu. Takový interferogram by pak přímo odpovídal diferenčnímu interferogramu. Naopak čím větší bude kolmá základna, tím menší hodnotu výškového rozdílu bude jeden interferenční proužek představovat a tím podrobnější digitální model terénu vznikne.

Přesnost, s jakou lze odečítat změny terénu, je ovlivněna především rozptylem interferometrické fáze (fázovým šumem) v interferogramu. Hodnoty vlnové délky mikrovlnného záření a polohových vektorů družic jsou známy s takovou přesností, že jejich vliv na celkovou přesnost je mnohonásobně nižší, než právě vliv nepřesnosti v určení interferometrické fáze.

Směrodatná odchylka interferometrické fáze (3.11) se vyhodnocuje z koherence mezi radarovými snímky, ze kterých příslušný interferogram vznikl, a je počítána podle následujícího vzorce [13]



$$\sigma_{\varphi} = \frac{1}{\sqrt{2N}} \cdot \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma_c} \quad (3.11)$$

kde  $\gamma_c$  je hodnota koherence vypočtená ze vzorku  $N$  nezávislých obrazových bodů podle vzorce (3.12) a  $P_i$  je komplexní hodnota vybraného pixelu

$$\gamma_c = \frac{\left| \sum_{i=1}^N (P_{1,i} \cdot P_{2,i}) \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^N P_{1,i}^2 \cdot \sum_{i=1}^N P_{2,i}^2}} \quad (3.12)$$

Pomocí takto vypočtené koherence lze vytvořit tzv. *koherenční mapu*, která dává pro jakékoli interferometrické páry radarových snímků normovanou představu o přesnosti vytvářeného digitálního modelu terénu. Hodnoty koherence leží vždy v rozmezí 0 (interferometrická fáze je pouhý šum) až 1 (absence fázového šumu). Pokud znázorníme hodnoty koherence pomocí stupňů šedi, tak místa s vysokou koherencí (např. povrch bez vegetace nebo zastavěná území) jsou světlá a místa s nízkou koherencí (např. zalesněné a vodní plochy, místa s polohovými změnami) jsou tmavá.

Čím nižší jsou hodnoty v koherenční mapě, tím větší bude směrodatná odchylka interferometrické fáze a tím větší bude i směrodatná odchylka výšek počítaného digitálního modelu terénu

$$\sigma_h = \sigma_{\varphi} \cdot \frac{R \cdot \lambda \cdot \sin \theta}{4\pi \cdot B_n} \quad (3.13)$$

Směrodatná odchylka interferometrické fáze se v případě družic ERS v místech s minimální použitelnou koherencí (0,3 - 0,4) pohybuje okolo hodnoty  $\pi/2$ , což odpovídá 1/4 interferenčního proužku.

V případě diferenčního interferogramu je situace trochu odlišná. Jeden interferometrický proužek v případě družic ERS zde odpovídá posunu o velikosti 2,8 cm. Uvážíme-li, že směrodatná odchylka interferometrické fáze se pohybuje v případě družic ERS na úrovni 1/4 interferenčního proužku, představuje diferenční interferometrie možnost měřit změny digitálního modelu terénu s přesností cca 7 mm. Této přesnosti lze však dosáhnout pouze v ideálním případě, když jsou snímky vůči sobě dostatečně koherentní, bez vlivu atmosféry a jiných rušivých vlivů, jako například bouřky.

## 4. Spektrální filtrování

Vlivem geometrie snímání, tj. rozdílnost úhlů pohledu v okamžiku pořizování snímků (vliv velikosti kolmé základny), mezi snímky vzniká *geometrická dekorelace* (*geometric "baseline" decorrelation*). Tato dekorelace roste lineárně s velikostí frekvenčního posunu mezi oběma snímky. Ekvivalent geometrické dekorelace ve směru azimutu je způsoben rozdílem frekvencí Dopplerových centroidů. Aby se interferogram mohl správně vyhodnotit, je potřeba tyto dekorelace zredukovat. Pro odstranění se používá spektrální filtrování, při kterém se odstraní části spektra, které se vyskytují v jednom snímku a nevyskytují v druhém snímku.

### 4.1 Signál a váhové funkce

Aby se docílilo co nejvyšší rozlišení, je potřeba, aby délka vyslaného pulsu  $\tau$  byla co nejkratší. Na druhou stranu je přijímán velmi slabý zpětný odraz (množství energie pulsu je omezené konstrukcí antény). Proto je nutné vyslat puls dostatečně dlouhý na to, aby zpětný odraz byl přijat s dostatečně velkou energií. Toho je docíleno vysláním pulsu s lineární kmitočtovou modulací, tzv. *chirp*.

Přijatý analogový časový signál  $x(t)$  je potřeba navzorkovat a zpracovat pomocí *diskrétní Fourierovy transformace (DFT)*. Při vzorkování musí být splněn Shannonův teorém  $f_s > 2f_h$ , kde  $f_h$  je maximální frekvence spektra signálu  $x(t)$  a  $f_s$  je *vzorkovací frekvence (sampling frequency)*. Je tedy nutné vyfiltrvat signál  $x(t)$  dolnofrekvenční propustí s mezní frekvencí  $f_h$ . To lze udělat pouze ve frekvenční oblasti tak, že se signál  $X(f)$  vynásobí přenosovou funkcí  $H(f)$ . Výstupem z filtru je signál  $X'(f)$

$$X'(f) = X(f) \cdot H(f) \quad (4.3)$$

Nejjednodušší přenosovou funkcí  $H(f)$  je *obdélníková okenní funkce  $\Pi$  (rectangular window)*

$$\Pi\left(\frac{f}{W}\right) = \begin{cases} 1 & \text{pro } |f| \leq W/2 \\ 0 & \text{ostatní} \end{cases} \quad (4.4)$$

Aplikace tohoto filtru však vyvolává v časové oblasti *Gibbsův jev (Gibbs phenomenon)*, tj. odezva na impuls obsahuje překmitý. Aby se tento jev omezil, aplikuje se filtr s jinou přenosovou funkcí, například *Hanningovo okno  $V_{\text{vonHann}}$  (Von Hann window)*

$$V_{\text{VonHann}}(f) = \begin{cases} 0,5 + 0,5 \cdot \cos \frac{2\pi f}{W} & \text{pro } |f| \leq \frac{W}{2} \\ 0 & \text{pro } |f| > \frac{W}{2} \end{cases} \quad (4.5)$$

Nebo *Hammingovo okno* (*Hamming window*)

$$V_{\text{Hamm}}(f) = \begin{cases} 0,54 + 0,46 \cdot \cos \frac{2\pi f}{W} & \text{pro } |f| \leq \frac{W}{2} \\ 0 & \text{pro } |f| > \frac{W}{2} \end{cases} \quad (4.6)$$

Nejčastěji se však používá *obecné Hammingovo okno* (*general Hamming window*)

$$V_{\text{Hamm}}(f) = \begin{cases} \alpha + (1 - \alpha) \cdot \cos \frac{2\pi f}{W} & \text{pro } |f| \leq \frac{W}{2} \\ 0 & \text{pro } |f| > \frac{W}{2} \end{cases} \quad (4.7)$$

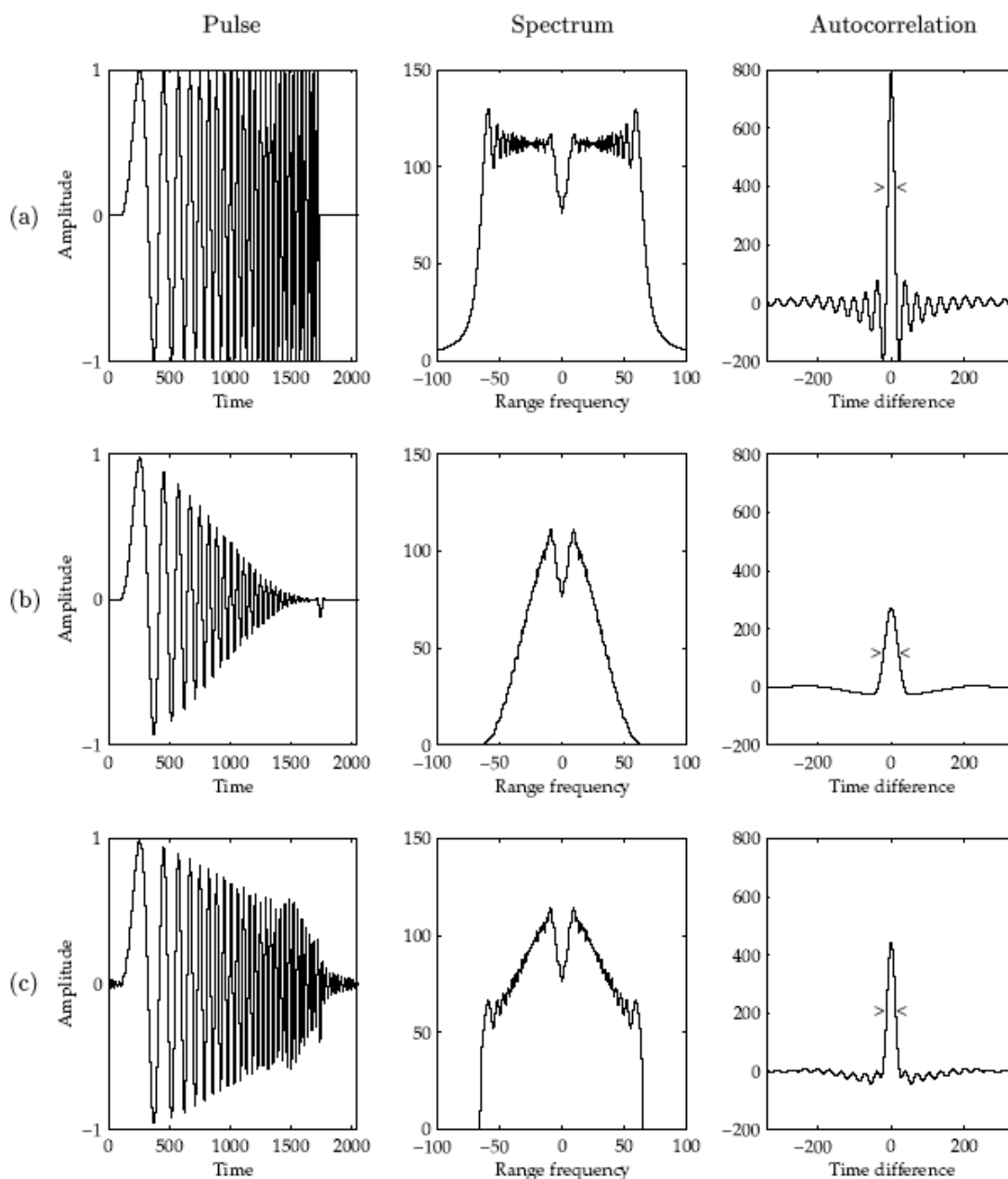
kde  $W$  je šířka spektra a výraz  $\alpha + (1 - \alpha) \cdot \cos(2\pi f)$  se nazývá *cosine on a pedestal* [26], [28].

Průchod signálu lineárním filtrem se v časové oblasti vyjádří konvolučním integrálem, který se dá zapsat pomocí konvolučního operátoru  $*$ . Signál  $x'(t)$  na výstupu filtru se pak vyjádří jako

$$x'(t) = x(t) * h(t) \quad (4.8)$$

kde  $h(t)$  se získá Fourierovou transformací přenosové funkce  $H(f)$ .

Signál  $x'(t)$  se pak dá navzorkovat s opakovací frekvencí  $f_s$  a je zde zaručeno, že spektrum  $x'(t)$  neobsahuje vyšší frekvenční složky než  $f_h$ . Vzorky  $x'(t_i)$  se pak zpracovávají diskretní Fourierovou transformací aplikací *rychlé Fourierovy transformace (FFT)*. Výsledkem FFT je periodické čárové spektrum, kde počet spektrálních čar v jedné periodě se rovná počtu zpracovaných vzorků. Díky předchozímu zpracování je zaručeno, že nedojde k *překrývání spekter (aliasing)*.



Obrázek 4.1: Zde je znázorněn rozdíl mezi jednotlivými váhovými funkcemi. Na obrázku (a) je znázorněn *chirp* a jeho autokorelační funkce. Na obrázku (b) je aplikováno *Hanningovo okno*. Na obrázku (c) je aplikováno *obecné Hammingovo okno* s koeficientem  $\alpha = 0.75$ , což je nejčastěji používáno pro ERS data. (Obrázek je převzat z [26].)

## 4.2 Frekvenční posun ve směru kolmém na směr letu (směr range)

### 4.2.1 Spektrum

Rozsah frekvenční oblasti spektra ve směru range je definován *vzorkovací frekvencí*  $f_{sr}$ . V případě ERS-1/2 nabývá hodnoty

$$f_{sr} = 18,96 \text{ MHz} \quad (4.9)$$

Na obrázku 4.5 je vidět, že skutečná šířka pásma signálu ve směru range je poněkud menší a je dána šířkou pásma chirpu ve směru range. V případě družic ERS nabývá hodnotu

$$W_r = a \cdot T = 15,55 \text{ MHz} \quad (4.10)$$

kde  $T$  je délka pulsu a  $a$  je faktor změny frekvence v čase. Bližší odvození je v [26], [28], [29].

Aby se daly určit vzdálenosti k jednotlivým odražečům na povrchu, je potřeba provést korelaci pulsu s přijatým signálem. Jelikož signály jsou si podobné, tak výsledkem je autokorelační funkce, která pro každý objekt má jedno velké maximum, tzv. *hlavní lalok (mainlobe)* a řadu menších *bočních laloků (sidelobes)* (obrázek 4.1 (a)). Nechtěné efekty chirpu, tj. boční laloky autokorelační funkce, jsou redukovány použitím váhové (okenní) funkce. Pro družice ERS se často volí obecné Hammingovo okno s koeficientem  $\alpha = 0,75$ . Výsledná *přenosová funkce (transfer function)*, charakterizující tvar spektra, má pro družice ERS tvar

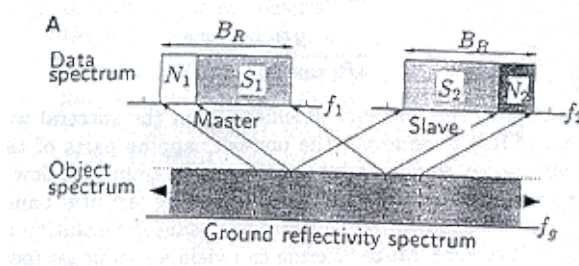
$$H(f_{sr}) = \left( 0,75 + 0,25 \cdot \cos \frac{2\pi f_{sr}}{W_r} \right) \Pi \left( \frac{f_{sr}}{W_r} \right) \quad (4.11)$$

Teoretický tvar této přenosové funkce je ukázán na obrázku 4.5 jako hladká křivka.

### 4.2.2 Posun spekter

Radarová interferometrie je založena na principu snímání území ze dvou různých míst (okraje kolmé základny), a proto se jejich snímací geometrie liší vlivem úhlů pohledu, což má za následek mírně odlišné úhly dopadu na stejném místě. Zpětný odraz zaznamenaný družicí, pořizující vedlejší snímek, bude obsahovat odlišnější část povrchu tzv. *objektové spektrum (object spectrum)*, než zpětný odraz zaznamenaný

družicí, pořizující hlavní snímek (obrázek 4.2). Z toho plyne, že odrazové charakteristiky povrchu jsou závislé na úhlu dopadu.



Obrázek 4.2: Na obrázku je ukázán vznik spektrálního posunu vlivem odlišných úhlů dopadu. Spektrum pak bude obsahovat oblasti  $S_1$  a  $S_2$ , které jsou společné pro hlavní i vedlejší snímek a oblasti  $N_1$  a  $N_2$ , které znázorňují nepřekrývající se části objektového spektra. Symboly  $B_r$  na snímku značí šířku spektra ve směru range a termín *Data spectrum* označuje měřitelnou šířku spektrálního pásma, jenž je určena vzorkovací frekvencí systému. (Obrázek je převzat z [23].)

Pro další odvození jsou zavedeny termíny *range frekvence*  $f_r$  (*range frequency*), frekvence signálu v šikmém směru (dána systémem radaru), a *ground range frekvence*  $f_g$  (*ground range frequency*), což je promítnutí range frekvence ze směru pohledu do roviny terénu

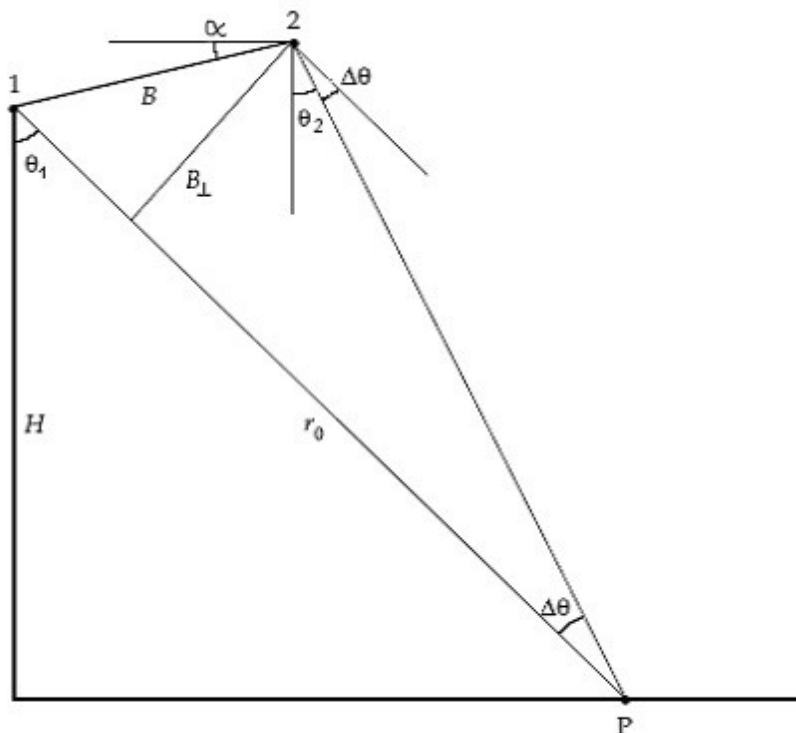
$$\lambda_g = \frac{\lambda_r}{2 \cdot \sin \theta} \quad (4.12)$$

kde  $\lambda_r$  je vlnová délka ve směru pohledu,  $\lambda_g$  je její projekce ze směru pohledu do roviny terénu a  $\theta$  je úhel dopadu.

Ground range frekvence pak bude mít tvar

$$f_g = \frac{c}{\lambda_g} = \frac{2 \cdot c \cdot \sin \theta}{\lambda_r} = 2 \cdot f_r \cdot \sin \theta \quad (4.13)$$

Při pohledu na obrázek 4.3 je vidět, že satelit na pozici 1 bude snímat území pod úhlem pohledu  $\theta_1$ , čemuž bude odpovídat ground range frekvence  $f_{g1}$ . Na pozici 2 tomu odpovídá úhel  $\theta_2$  a ground range frekvence  $f_{g2}$ . Z rovnice (4.13) plyne, že různé frekvence objektového spektra mají stejnou range frekvenci. Je nutné si však uvědomit, že tvar range spektra je určen systémem radaru se syntetickou aperturou a je stejný pro hlavní i vedlejší snímek, tudíž rozdíl v objektovém spektru není viditelný jako posun v range spektru.



Obrázek 4.3: Satelit z pozice 1 snímá terén pod úhlem  $\theta_1$ , zatímco satelit z pozice 2 snímá pod úhlem  $\theta_2$ . Důsledkem toho pak spektrum snímku 1 obsahuje část objektového spektra, které není přítomné ve snímku 2 a naopak. (Obrázek převzat z [26]).

Je zřejmé, že spektrum hlavního snímku obsahuje část objektového spektra, které není součástí spektra vedlejšího snímku. A naopak spektrum vedlejšího snímku obsahuje část objektového spektra, které se nenachází v hlavním snímku. To vede ke snížení korelace. Tím, že se odstraní ty části objektového spektra, které se nenachází současně v obou snímcích, se sice geometrická dekorelace zredukuje, ale bohužel se tím zhorší i rozlišení, protože dojde ke zmenšení šířky pásma signálu.

Je třeba si uvědomit, že pokud mezi snímky bude příliš velká základna, korelace bude velmi nízká a snímky nebudou vhodné pro interferometrické zpracování. Jelikož je zřejmé, že se jedná o závislost na velikosti základny, v literatuře se proto často používá termín *baseline decorrelation error*. Úplná dekorelace nastává v případě *kritické základny* (*critical baseline*).

Kritická základna  $B_{n,crit}$  je funkcí úhlu dopadu  $\theta_i$  a topografického sklonu  $\alpha$ .

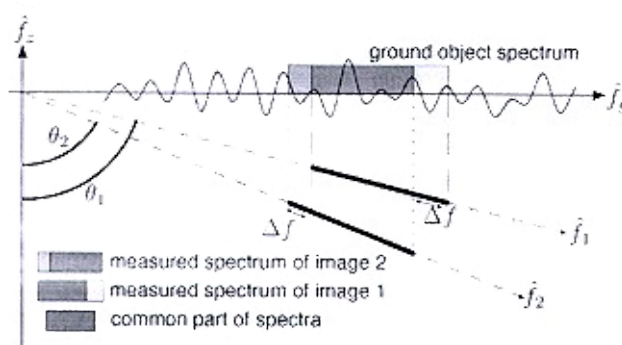
$$|B_{n,crit}| = \frac{\lambda \cdot W_r \cdot r_0 \cdot \tan(\theta_i - \alpha)}{c} \quad (4.14)$$

Korelace mezi snímky může být definována jako

$$|\gamma| = \begin{cases} \frac{B_{n,crit} - B_n}{B_{n,crit}} & \text{pro } |B_n| \leq B_{n,crit} \\ 0 & \text{pro } |B_n| > B_{n,crit} \end{cases} \quad (4.15)$$

Je zřejmé, že pokud je základna příliš velká, korelace mezi snímky se blíží k nule. Pro každý systém lze najít optimální kolmou základnu, v případě družic ERS je velikost optimální základny pro topografické mapování 300 - 400 m [13]. Metodou nalezení teoreticky optimální základny se zabývá [39].

Jak bylo řečeno výše, vlivem mírně se měnících úhlů pohledu jsou detektorem zaznamenány různé části objektového spektra povrchu. Jednou z metod, která se používá k odvození posunu v objektovém spektru, se nazývá *posun vlnového čísla* (*wavenumber shift*) a jako první ji uvedl Gatelli v roce 1994 [26], [31] (obrázek 4.4).



Obrázek 4.4: Velikost spektrálního posunu objektového spektra je způsobena rozdílem lokálních úhlů dopadu, díky čemuž jsou vlnová čísla objektového spektra posunuta do jiných frekvencí. (Obrázek převzat z [34]).

*Vlnové číslo k (wavenumber)* je definováno jako

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4.16)$$

Pokud se provede jeho projekce do roviny terénu, dostane se vztah mezi range frekvencí a *ground range vlnovým číslem (ground wavenumber)*

$$k_g = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \sin(\theta - \alpha) = \frac{4\pi \cdot f_r}{c} \cdot \sin(\theta - \alpha) \quad (4.17)$$

Pro jednoduchost je uvažován konstantní rovnoměrný sklon terénu. Vliv různých úhlů pohledu na obou stranách základny způsobuje, že úhel dopadu se mění. Pokud je tato změna označena jako  $\Delta\theta$ , je možné vypočítat posun vlnového čísla derivováním rovnice (4.17) podle  $\theta$



$$\Delta k_g = \frac{4\pi \cdot f_r \cdot \Delta\theta}{c} \cdot \cos(\theta - \alpha) \quad (4.18)$$

přičemž  $\theta$  se bere jako průměrná hodnota úhlů dopadu z obou stran základny. Právě tato změna úhlů pohledu  $\Delta\theta$  způsobuje nežádáný posun v objektových spektrech.

Protože šířka pásma signálu je malá při porovnání s frekvencí signálu, range frekvence  $f_r$  může být nahrazena *střední frekvencí*  $f_0$  (*central frequency*). Pro získání vlivu míry dekorelace vlivem základny, se porovná posun vlnového čísla se šířkou pásma  $W_r$ . Proto výraz (4.17) je potřeba vyjádřit jako odpovídající frekvenční posun  $\Delta f_r$  (*frequency shift*)

$$f_r = \frac{c}{4\pi} \cdot k_g \cdot \frac{1}{\sin(\theta - \alpha)} \quad (4.19)$$

zderivováním (4.19) podle  $\theta$

$$\Delta f_r = \frac{c}{4\pi} \cdot k_g \cdot \frac{-\Delta\theta}{\sin^2(\theta - \alpha)} \cdot \cos(\theta - \alpha) \quad (4.20)$$

pokud se nahradí  $k_g$  v rovnici výrazem (4.17), při použití střední frekvence  $f_0$ , dostane se

$$\Delta f_r = -f_0 \cdot \frac{\Delta\theta}{\tan\theta} \quad (4.21)$$

Jelikož pro plochý povrch je možné uvažovat, že

$$\Delta\theta \approx \frac{B_n}{r_0} \quad (4.22)$$

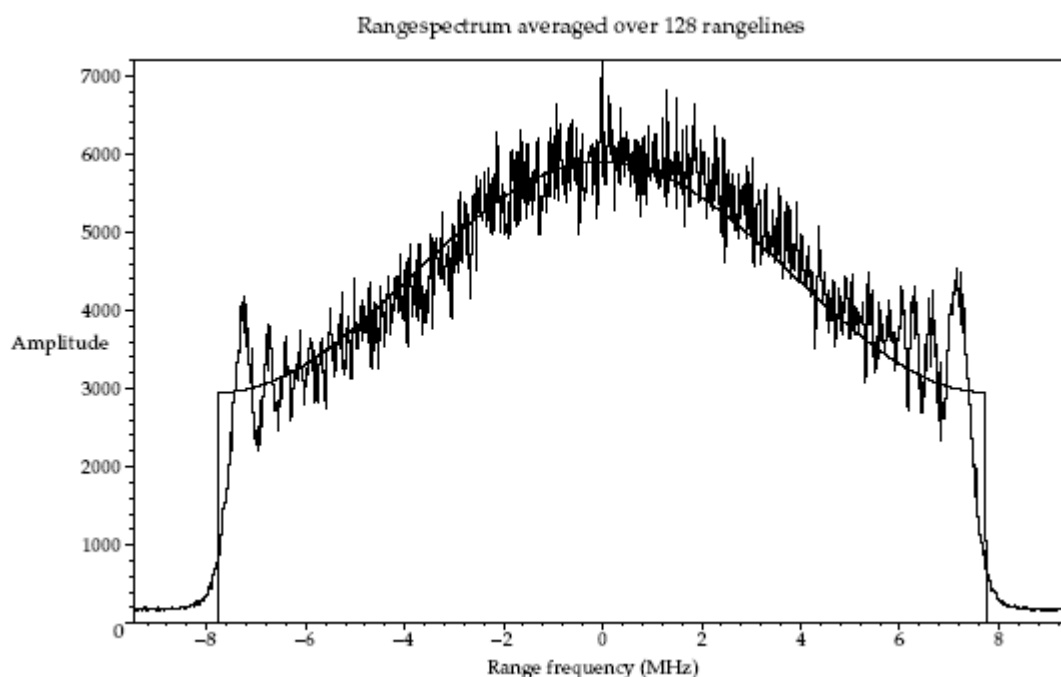
frekvenční posun se pak vyjádří jako

$$\Delta f_r = -\frac{f_0}{\tan(\theta - \alpha)} \cdot \Delta\theta = -\frac{c \cdot B_n}{r_0 \cdot \lambda \cdot \tan(\theta - \alpha)} \quad (4.23)$$

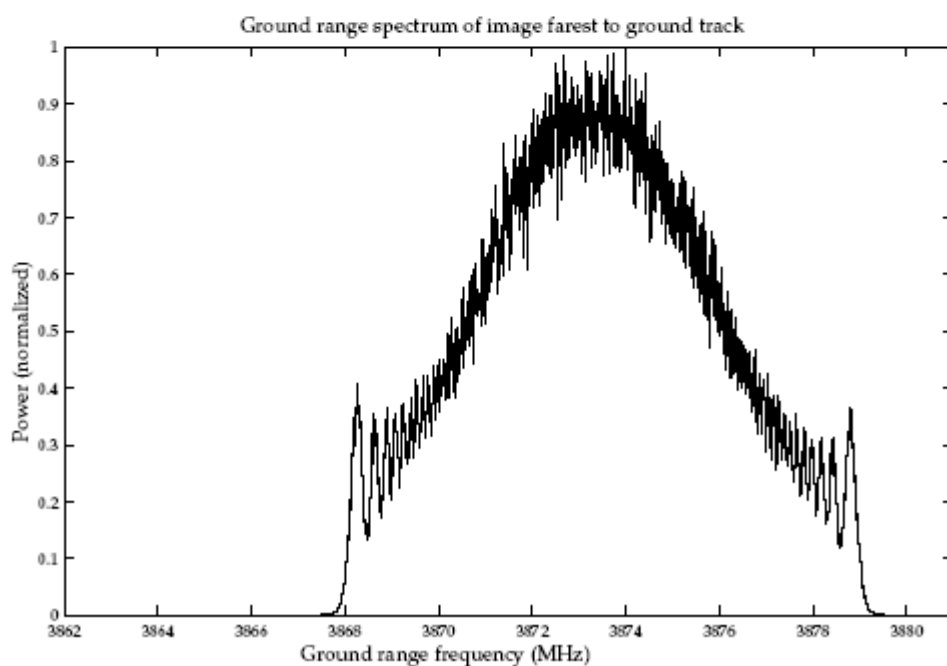
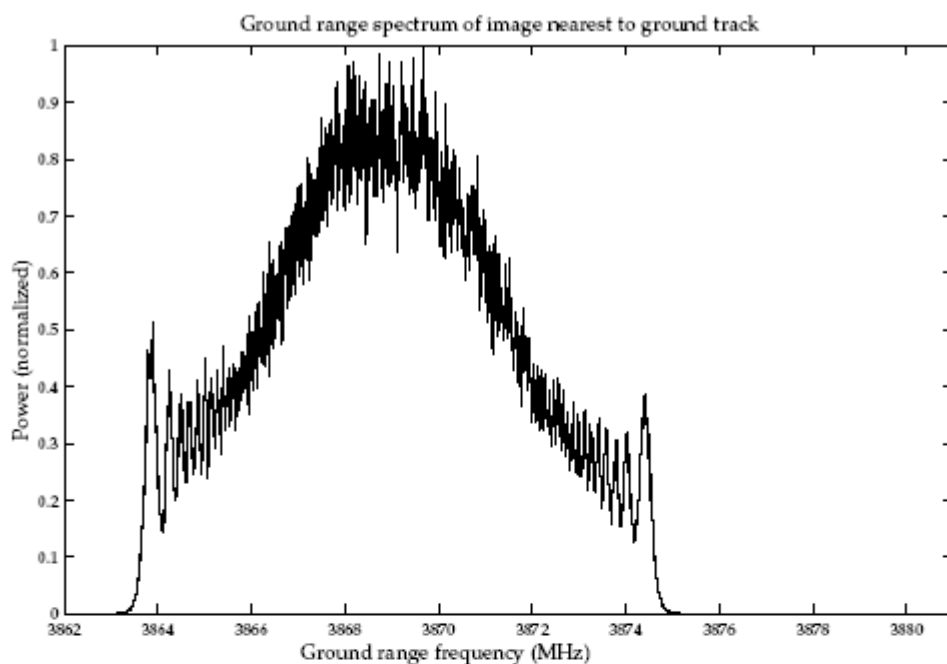
V tomto tvaru je posun range frekvence  $\Delta f_r$  shodný s *frekvencí proužků*  $f_{fringe}$  (*fringe frequency*), tj. počet interferenčních proužků na 1 pixel

$$\Delta f_r = f_{fringe} \quad (4.24)$$

Je potřeba zdůraznit, že výraz (4.23) nevyjadřuje, že změna úhlu pohledu posune radarovou šířku spektra  $W_r$  o  $\Delta f_r$ . Pouze vyjadřuje, že změnou úhlu pohledu signál zpětného odrazu obsahuje různé spektrální složky povrchové odrazivosti. Jinými slovy, pokud se uvažují přijaté signály ze dvou různých míst s rozdílem úhlů pohledu  $\Delta\theta$ , tak (4.23) vyjadřuje, že stejné spektrální prvky z prvního signálu budou v druhém signálu posunuty o  $\Delta f_r$ . Jestliže je známa kolmá základna  $B_n$ , nebo rozdíl úhlů dopadu  $\Delta\theta$ , lze znázornit ground range frekvenční posun převedením range frekvence na ground range frekvenci pro spektrum hlavního i vedlejšího snímku (obrázek 4.6).



Obrázek 4.5: Průběh spektra ve směru kolmém na směr letu pro 128 vzorků. Na svislé ose jsou hodnoty amplitudy, na vodorovné ose je vynesena range frekvence. Teoretický průběh spektra (přenosová funkce) je znázorněn hladkou křivkou. (Obrázek převzat z [26].)



Obrázek 4.6: Pro představu je uvedený obrázek z [26], znázorňující spektra ERS-1 snímků z orbity 8040 a 8541 pro 128 vzorků jako *ground range frekvence*. Hlavní snímek 8040 je blíž k projekci letové dráhy na povrch (*ground track*) a vykazuje tak nižší *ground range frekvenci*, zatímco vedlejší snímek 8541 má vyšší *ground range frekvenci*. Kolmá základna je 376,7 m, průměrný úhel dopadu je  $21,421^\circ$  a vzdálenost  $r_0 = 844$  km. Následkem toho pak posun ve směru range je 6,026 MHz a posun ve směru ground range je 4,102 MHz.

## 4.3 Frekvenční posun ve směru letu (směr azimutu)

### 4.3.1 Spektrum

Jelikož satelit během letu vysílá svazky mikrovlnného vlnění s opakovací frekvencí PRF (pulse repetition frequency), vzdálenost spektrálních čar je ve směru azimutu dána právě hodnotou PRF a v případě ERS-1/2 nabývá hodnoty

$$f_{\text{PRF}} = 1679 \text{ Hz} \quad (4.25)$$

Z obrázku 4.7 je zřejmé, že skutečná šířka pásma signálu ve směru azimutu je menší než vzorkovací frekvence. V případě družic ERS se používá hodnota

$$W_a \approx 1378 \text{ Hz} \quad (4.26)$$

Obdobně jako v případě pulsu ve směru kolmém na směr letu, i zde se vyskytuje nežádoucí efekt bočních laloků, které jsou způsobeny funkcí sinus cardinalis. V případě družic ERS se jako váhová (okenní) funkce používá obecné Hammingovo okno s koeficientem  $\alpha = 0,75$ . Výsledná *přenosová funkce (transfer function)* spektra ve směru letu pro družice ERS má tvar

$$H(f_{\text{PRF}}) = \left( 0,75 + 0,25 \cdot \cos \frac{2\pi(f_{\text{PRF}} - f_{\text{DC}})}{W_a} \right) \cdot \left( \sin c \frac{f_{\text{PRF}} - f_{\text{DC}}}{f_{\text{DOP}}} \right)^2 \Pi \left( \frac{f_{\text{PRF}} - f_{\text{DC}}}{W_a} \right) \quad (4.27)$$

kde  $f_{\text{DC}}$  je *frekvence Dopplerova centroidu*,  $f_{\text{DOP}} \approx 1505 \text{ Hz}$  je parametr dopplerovské šířky pásma popisující úhel paprsku anténního diagramu a funkce sinus cardinalis je dána tvarem  $\sin c x = \frac{\sin \pi x}{\pi x}$ . Teoretický tvar této přenosové funkce je znázorněn na obrázku 4.7 jako hladká křivka.

V rovnici 4.27 je střed spektra azimutu posunutý z nulové frekvence o hodnotu  $f_{\text{DC}}$ , což je frekvence Dopplerova centroidu paprsku. Pokud by snímaný cíl měl nulovou rychlost, tak dopplerův posun odrazu by byl nulový. Toto však neplatí pro povrch, protože má danou rychlost vlivem rotace Země. Přestože je tento vliv elektronicky kompenzován a osa paprsku je směřována kolmo na směr letu, společný vliv inklinace orbity, rotace Země a manévrovacích pohybů družice způsobuje, že paprsek je mírně odkloněn od nulové hodnoty. Tento úhel, mezi směrem osy vysílání signálu a směrem s nulovou dopplerovou frekvencí, je vyjádřen úhlovou odchylkou vyzařování (squint angle). Toto odchýlení je ve spektru znázorněno jako frekvenční posunutí.

### 4.3.2 Posun spekter

Vlivem rozdílné úhlové odchytky vyzařování senzorů či sbíhavosti drah kvůli zemské rotaci a vnějším vlivů mají snímky různé Dopplerovy centroidy, což vede k posunu spektra (obrázek 4.8). Stává se tedy, že i když jsou oba snímky získány se stejné družice (časový interval mezi snímky je celočíselný násobek 35 dní), tak jejich Dopplerovy centroidy se mírně liší

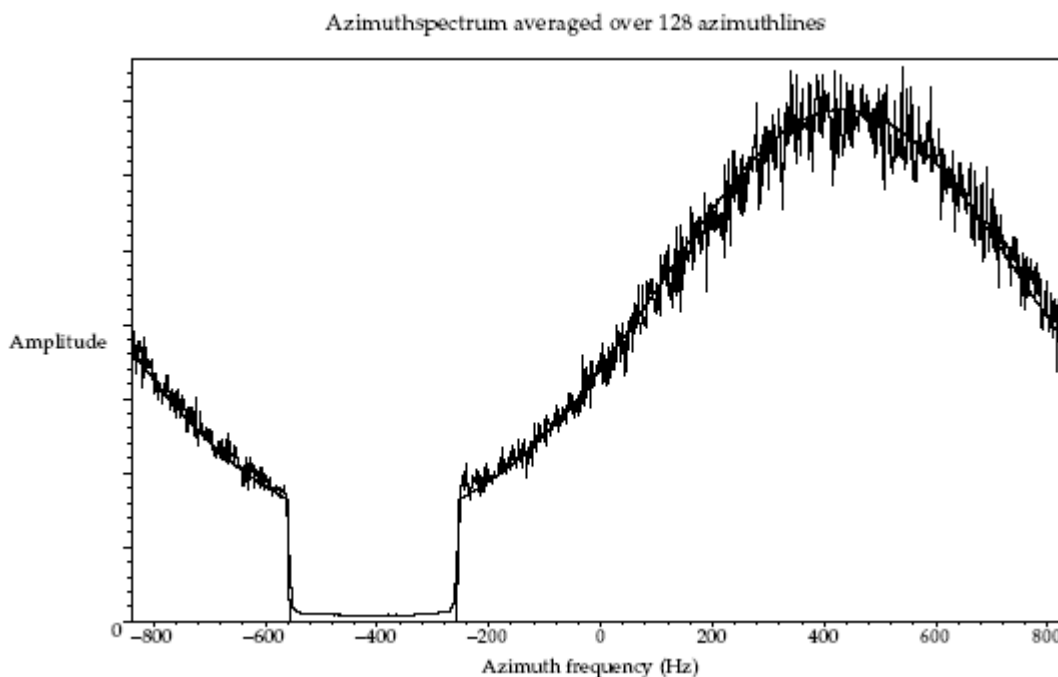
$$\Delta f_{DC} = f_{DCm} - f_{DCs} \quad (4.28)$$

kde  $f_{DCm}$  je frekvence Dopplerova centroidu pro hlavní snímek a  $f_{DCs}$  je frekvence Dopplerova centroidu pro vedlejší snímek. Samozřejmě čím větší rozdíl frekvencí Dopplerova centroidu mají snímky, tím menší je jejich korelace. Filtrování se v tomto případě provede vybráním společné části spektra, které je vycentrováno na průměrnou hodnotu centroidů.

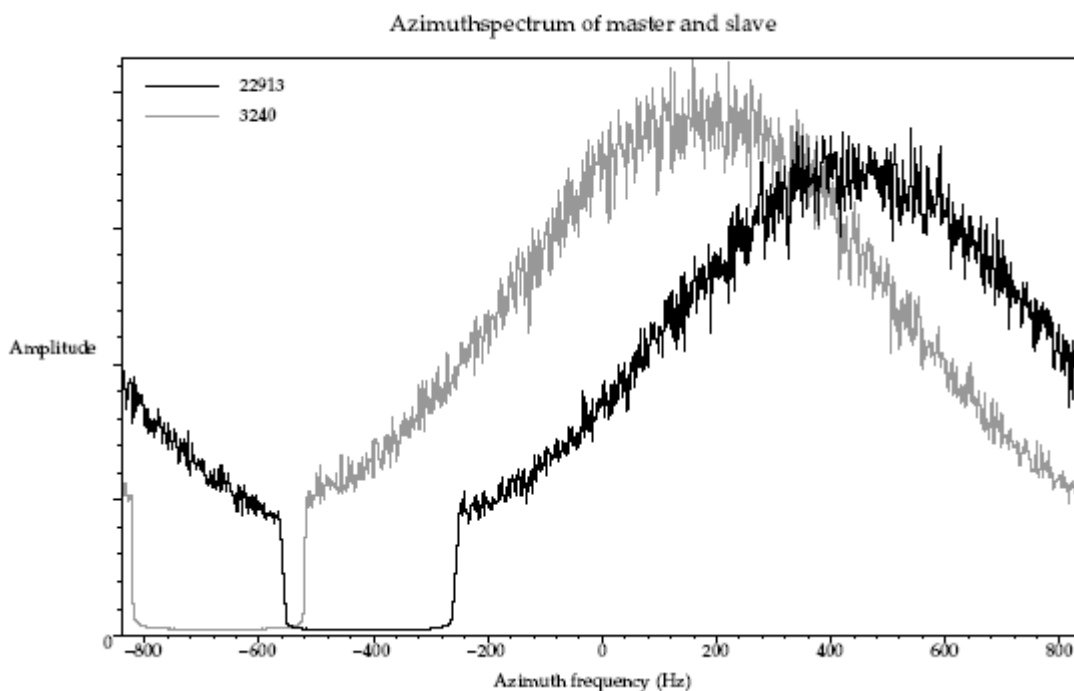
V tomto případě korelace mezi snímky  $\gamma$  klesá s rostoucím rozdílem frekvencí Dopplerova centroidu  $\Delta f_{DC}$

$$|\gamma| = \begin{cases} 1 - \frac{\Delta f_{DC}}{W_a} & \text{pro } |\Delta f_{DC}| \leq W_a \\ 0 & \text{pro } |\Delta f_{DC}| > W_a \end{cases} \quad (4.29)$$

kde  $W_a$  je šířka pásma ve směru azimutu.



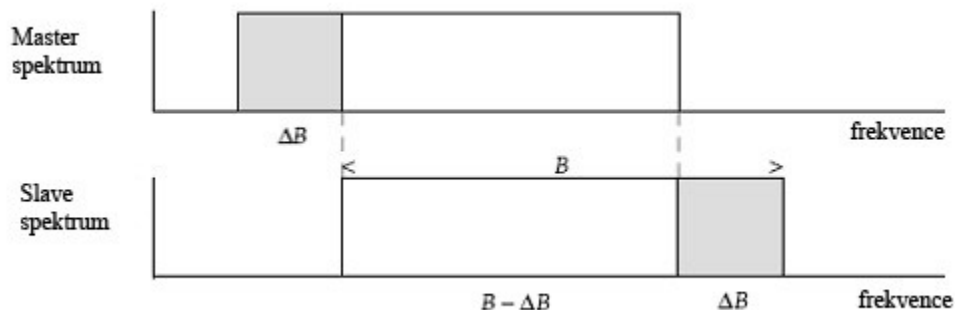
Obrázek 4.7: Průběh spektra ve směru azimutu pro 128 vzorků. Na svislé ose jsou vyneseny hodnoty amplitudy, na vodorovné ose jsou vyneseny hodnoty frekvence ve směru azimutu. Teoretický průběh spektra (přenosová funkce) je znázorněn hladkou křivkou. Na obrázku je zřejmý posun frekvence Dopplerova centroidu od nulové frekvence vlivem úhlu  $\psi$ , tj. úhlové odchylce vyzařování. (Obrázek převzat z [26].)



Obrázek 4.8: Pro ukázkou tohoto jevu je použit obrázek z [26], kde je zobrazen průběh spektra ve směru azimutu pro 128 vzorků snímku z orbity 22913 (ERS-1) s Dopplerovým centroidem 421,86 Hz a z orbity 3240 (ERS-2) s Dopplerovým centroidem 169,23 Hz.

#### 4.4 Teoretické filtrování spektra

Dekorelace způsobená spektrálním vychýlením může být odstraněna filtrováním, tj. odstraněním částí spektra, které nejsou společné pro oba snímky.



Obrázek 4.9: Na obrázku je vidět, že v obou spektrech se vyskytují části  $\Delta B$  (odpovídá  $\Delta W$ ), které se nevyskytují ve společné šířce pásma signálu  $B$  (odpovídá  $W$ ).

Nejprve je uvažován obdélníkový tvar spektra (obrázek 4.9). Budou se zde tudíž nacházet části spektra  $\Delta B$  (odpovídá  $\Delta W$ ), která nejsou společné pro oba snímky a způsobují v interferogramu nechtěný šum. Výsledkem jejich odstranění bude nezašumělý interferogram (*noise-free interferogram*).

Poměr *signál/šum*  $SNR$ , (*signal-to-noise ratio*), tj. poměr výkonu signálu ku výkonu šumu, pak bude dán poměrem šířky společného pásma ku šířce odstraněného pásma. Je dobré si uvědomit, že čím nižší bude poměr signál/šum, tím nižší bude korelace mezi snímky.

$$SNR = \frac{W - \Delta W}{\Delta W} \quad (4.30)$$

Korelace interferogramu se dá vyjádřit (na základě [26], [39]) jako

$$\gamma = \frac{1}{1 + SNR^{-1}} = 1 - \frac{\Delta W}{W} \quad (4.31)$$

Pro výpočet ve směru range se dosazuje za  $\Delta W = |\Delta f_r|$  a za šířku spektra pro ERS  $W_r = 15,55$  MHz. V případě azimutu se dosazuje za  $\Delta W = |\Delta f_{DC}|$  a za šířku spektra pro ERS  $W_a = 1378$  Hz.

V případě obdélníkového tvaru spektra je korelace lineárně závislá na velikosti kolmé základny (pro range filtrování) a rozdílu frekvencí Dopplerova centroidu (pro azimutové filtrování). Tento jev je znázorněn jako diagonální čára na obrázku 4.11. Úplná dekorelace nastane v okamžiku, kdy  $|\Delta f_r| > W_r$  pro range a  $|\Delta f_{DC}| > W_a$  pro azimut.

Očekávané zlepšení *interferogramu*  $m$  je dáno vztahem

$$m_{\text{azimut}} = \frac{1}{\gamma_{\text{azimut}}} = \frac{W_a}{W_a - \Delta f_{DC}} \quad (4.32)$$

$$m_{\text{range}} = \frac{1}{\gamma_{\text{range}}} = \frac{W_r}{W_r - \Delta f_r} \quad (4.33)$$

Ve skutečnosti však průběh spektra není obdélníkový. Jak bylo uvedeno v kapitole 4.2.1, na spektrum e směru kolmém na směr letu (směr range) je aplikována obecná Hammingova váhová funkce.

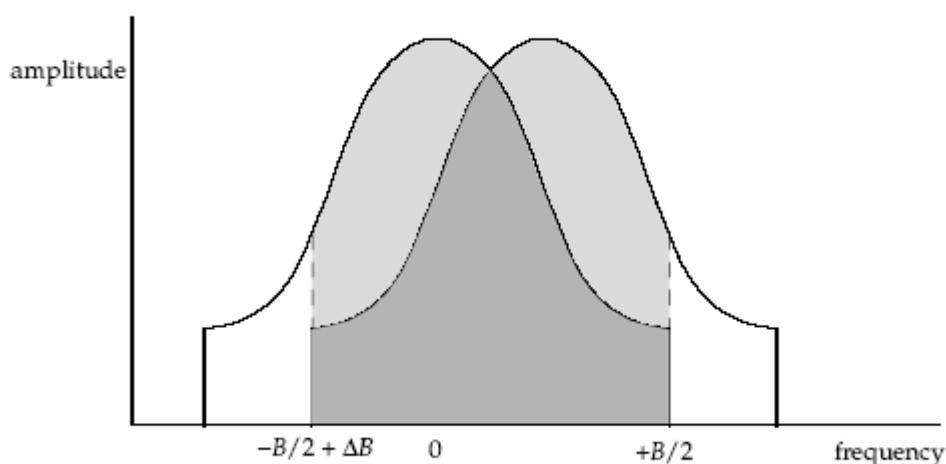
V případě spektrálního posunu ve směru range dochází pouze k rozdílu mezi objektovými spektry, a tudíž případný posun při porovnání range spekter není viditelný. Proto tvar spektra (přenosová funkce) je vyjádřen jako posun spektra o frekvenci  $\Delta f_r$ .

$$H(f_r, \Delta f_r) = \left( 0,75 + 0,25 \cdot \cos \frac{2\pi(f_r - \Delta f_r)}{W_r} \right) \Pi \left( \frac{f_r}{W_r} \right) \quad (4.34)$$

V kapitole 4.3.1 je uvedeno, že tvar spektra (přenosová funkce) ve směru azimutu se skládá z funkce sinus cardinalis a obecné Hammingovy váhové funkce

$$H(f_{PRF}, \Delta f_{DC}) = \left( 0,75 + 0,25 \cdot \cos \frac{2\pi(f_{PRF} - f_{DC})}{W_a} \right) \cdot \left( \sin c \frac{f_{PRF} - f_{DC}}{f_{DOP}} \right)^2 \Pi \left( \frac{f_{PRF}}{W_a} \right) \quad (4.35)$$

Po odstranění částí, které nejsou společné pro oba snímky, by přenosové funkce obou snímků měly být stejné. Očekávaná korelace je vypočtena na základě obrázku 4.10.



Obrázek 4.10: Korelaci je možné spočítat jako poměr nepřekrývajícího se spektra  $\Delta B$  (světle šedá) ku překrývajícímu se spektru (tmavě šedá). (Obrázek převzat z [26])

Korelace pro spektrum ve směru azimutu

$$\gamma_{azimut}(\Delta f_{DC}) = \frac{1}{A_{azimut}} \int_{-f_{PRF}/2}^{f_{PRF}/2} H(f_{PRF}, 0) \cdot H(f_{PRF}, \Delta f_{DC}) \quad (4.36)$$

$$A_{azimut} = \int_{-f_{PRF}/2}^{f_{PRF}/2} (H(f_{PRF}, 0))^2 df_{PRF} \quad (4.37)$$

Kde  $H(f_{PRF}, \Delta f_{DC})$  je z rovnice 4.35. Kvůli výskytu obdélníkové funkce  $\Pi$  v rovnici 4.35 probíhá integrování v rozmezí od  $-W_a/2 + |\Delta f_{DC}|$  do  $B_a/2$  (obrázek 4.10). Tato teoretická korelace je znázorněna na obrázku 4.11.

Korelace pro spektrum ve směru range



$$\mathcal{V}_{\text{range}}(\Delta f_r) = \frac{1}{A_{\text{range}}} \int_{-f_r/2}^{f_r/2} H(f_r, 0) \cdot H(f_r, \Delta f_r) \quad (4.38)$$

$$A_{\text{range}} = \int_{-f_r/2}^{f_r/2} (H(f_r, 0))^2 df_r \quad (4.39)$$

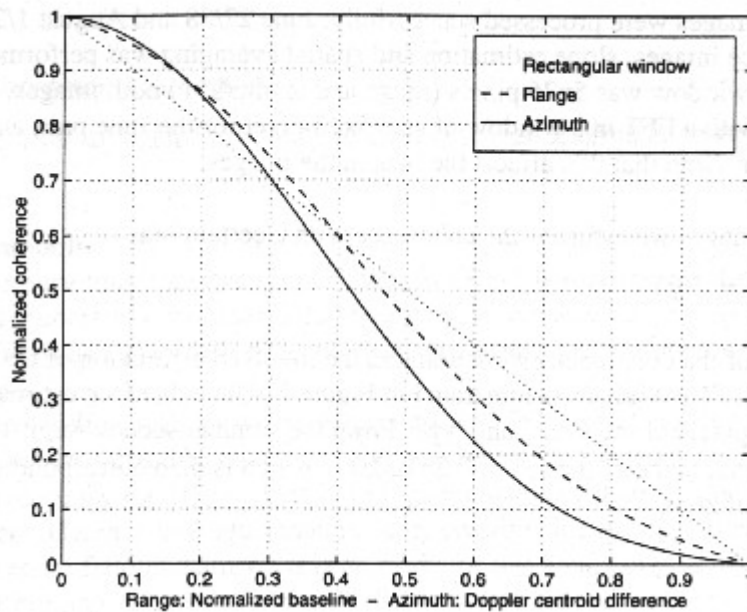
Kde  $H(f_r, \Delta f_r)$  je z rovnice 4.34. Kvůli výskytu obdélníkové funkce  $\Pi$  v rovnici 4.34 probíhá integrování v rozmezí od  $-W_r/2 + |\Delta f_r|$  do  $B_r/2$  (obrázek 4.10). Tato teoretická korelace je znázorněna na obrázku 4.11.

Po odstranění částí spektra, která nejsou společná budou mít přenosové funkce stejný tvar a geometrická dekorelace bude nulová.

Očekávané zlepšení *interferogramu*  $m$  filtrováním spektra pak bude

$$m_{\text{azimut}} = \frac{1}{\gamma_{\text{azimut}}(\Delta f_{\text{DC}})} \quad (4.40)$$

$$m_{\text{range}} = \frac{1}{\gamma_{\text{range}}(\Delta f_r)} \quad (4.41)$$



Obrázek 4.11: Průběh teoretické korelace v závislosti na volbě váhové funkce pro azimut a range. Hodnota 1 na vodorovné ose odpovídá normované maximální základně a úplnému rozdílu Dopplerových centroidů. V případě obdélníkové váhové funkce (rectangular window) se jedná o diagonální čáru. (Obrázek převzat z [30].)

#### 4.4.1 Způsob filtrování ve směru kolmém na směr letu

Aby došlo k odstranění geometrické dekorelace, je potřeba ztotožnit přenosové funkce pro hlavní i vedlejší snímek.

Nejdříve se použije *inverzní Hammingova váhová funkce*  $V_{InvHamm}(f_r)$  ve tvaru

$$V_{InvHamm}(f_r) = \frac{1}{0,75 + 0,25 \cdot \cos \frac{2\pi f_r}{W_r}} \Pi \left( \frac{f_r}{W_r} \right) \quad (4.42)$$

Na základě tohoto kroku dojde k posunutí spekter vůči sobě a k rozhodnutí, které strany budou odfiltrovány (pokud bude ze spektra hlavního snímku odstraněn záporný frekvenční posun, tak ze spektra vedlejšího snímku musí být odstraněn kladný frekvenční posun). Následně se na nové šířky spektra obou snímků  $W_{rangefilt}$  použije *nová Hammingova váhová funkce*  $V_{Hamm}(f_r)$ , která je vycentrovaná na novou šířku pásma. Aplikace inverzní a nové Hammingovy váhové funkce je znázorněna na obrázku 4.12.

$$W_{rangefilt} = W_r - |\Delta f_r| \quad (4.43)$$

$$V_{HammM}(f_r) = \left( 0,75 + 0,25 \cdot \cos \left( 2\pi \frac{f_r - \frac{1}{2}|\Delta f_r|}{W_r - |\Delta f_r|} \right) \right) \Pi \left( \frac{f_r - \frac{1}{2}|\Delta f_r|}{W_r - |\Delta f_r|} \right) \quad (4.44)$$

$$V_{HammS}(f_r) = \left( 0,75 + 0,25 \cdot \cos \left( 2\pi \frac{f_r + \frac{1}{2}|\Delta f_r|}{W_r - |\Delta f_r|} \right) \right) \Pi \left( \frac{f_r + \frac{1}{2}|\Delta f_r|}{W_r - |\Delta f_r|} \right) \quad (4.45)$$

Výsledné filtrování se provede tak, že spektrum snímku  $H(f_r)$  vynásobíme inverzní Hammingovou funkcí  $V_{InvHamm}(f_r)$  a novou Hammingovou váhovou funkcí  $V_{Hamm}(f_r)$ .

$$H_{rangefiltM}(f_r) = H_M(f_r) \cdot V_{InvHamm}(f_r) \cdot V_{HammM}(f_r) \quad (4.46)$$

$$H_{rangefiltS}(f_r) = H_S(f_r) \cdot V_{InvHamm}(f_r) \cdot V_{HammS}(f_r) \quad (4.47)$$

Výsledné přenosové funkce jsou totožné a dojde k redukcí geometrické dekorelace.

#### 4.4.2 Způsob filtrování ve směru azimutu

Aby došlo k redukcí geometrické dekorelace, je potřeba odstranit části spektra, které nejsou společné a ztotožnit tak přenosovou funkcí  $H(f_{PRF})$  pro hlavní i vedlejší snímek.

$$H(f_{PRF}) = H(f_{PRF} - f_{DCm}) \cdot F_m(f_{PRF}) = H(f_{PRF} - f_{DCs}) \cdot F \quad (4.48)$$

kde  $H(f_{\text{PRF}} - f_{\text{DCm}})$  je přenosová funkce pro hlavní snímek,  $H(f_{\text{PRF}} - f_{\text{DCs}})$  je přenosová funkce pro vedlejší snímek,  $F_m(f_{\text{PRF}})$  a  $F_s(f_{\text{PRF}})$  jsou funkce spektrálních filtrů.

Rovnice (4.48) je splněna, když

$$F_m(f_{\text{PRF}}) = \sqrt{\frac{H(f_{\text{PRF}} - f_{\text{DCs}})}{H(f_{\text{PRF}} - f_{\text{DCm}})}} \quad (4.49)$$

$$F_s(f_{\text{PRF}}) = \sqrt{\frac{H(f_{\text{PRF}} - f_{\text{DCm}})}{H(f_{\text{PRF}} - f_{\text{DCs}})}} \quad (4.50)$$

Po úpravě pak rovnice (4.44) přejde do tvaru

$$H(f_{\text{PRF}}) = \sqrt{H(f_{\text{PRF}} - f_{\text{DCm}}) \cdot H(f_{\text{PRF}} - f_{\text{DCs}})} \quad (4.51)$$

Filtr je ve skutečnosti geometrický střed obou spekter. Je potřeba si uvědomit, že funkce  $F_m(f_{\text{PRF}})$  a  $F_s(f_{\text{PRF}})$  nezodpovídají za skutečnost, že spektrum obsahuje více frekvenčních pásem, ze kterých se využije jen jedno (vliv posunutí o frekvenci Dopplerova centroidu).

Proto se navíc přidává obdélníkové okno  $\tilde{\Pi}$  a filtry pak budou ve tvaru

$$\tilde{F}_m(f_{\text{PRF}}) = F_m(f_{\text{PRF}}) \cdot \tilde{\Pi}(f_{\text{PRF}}) = \sqrt{\frac{H(f_{\text{PRF}} - f_{\text{DCs}})}{H(f_{\text{PRF}} - f_{\text{DCm}})}} \cdot \tilde{\Pi}(f_{\text{PRF}}) \quad (4.52)$$

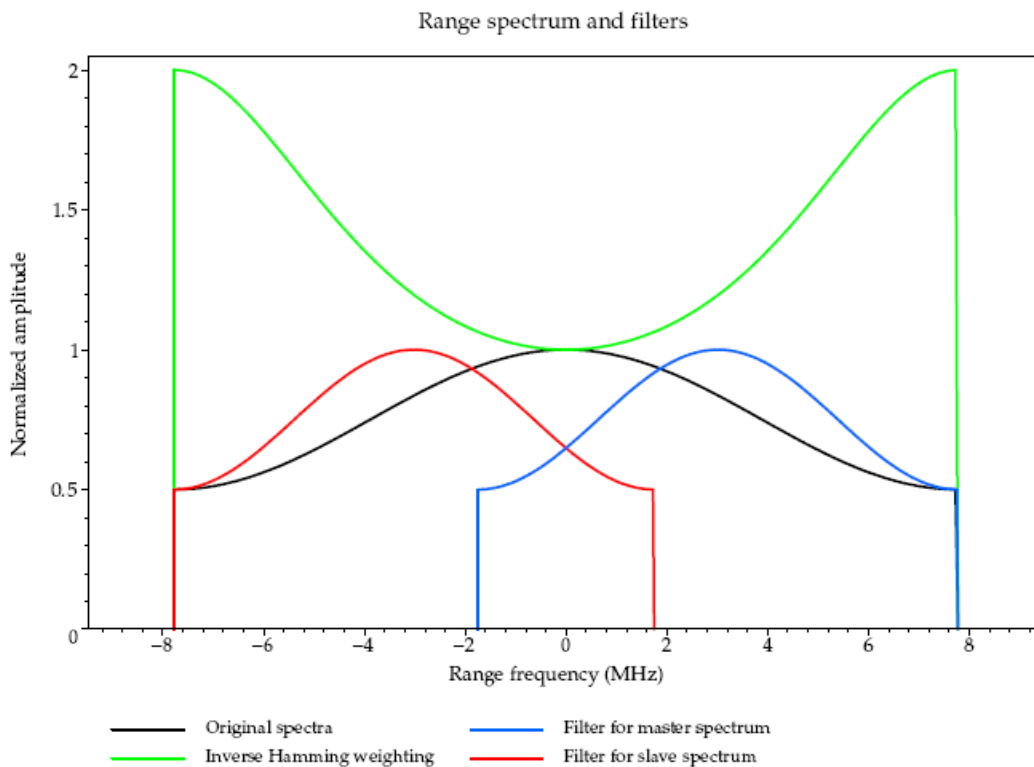
$$\tilde{F}_s(f_{\text{PRF}}) = F_s(f_{\text{PRF}}) \cdot \tilde{\Pi}(f_{\text{PRF}}) = \sqrt{\frac{H(f_{\text{PRF}} - f_{\text{DCm}})}{H(f_{\text{PRF}} - f_{\text{DCs}})}} \cdot \tilde{\Pi}(f_{\text{PRF}}) \quad (4.53)$$

kde

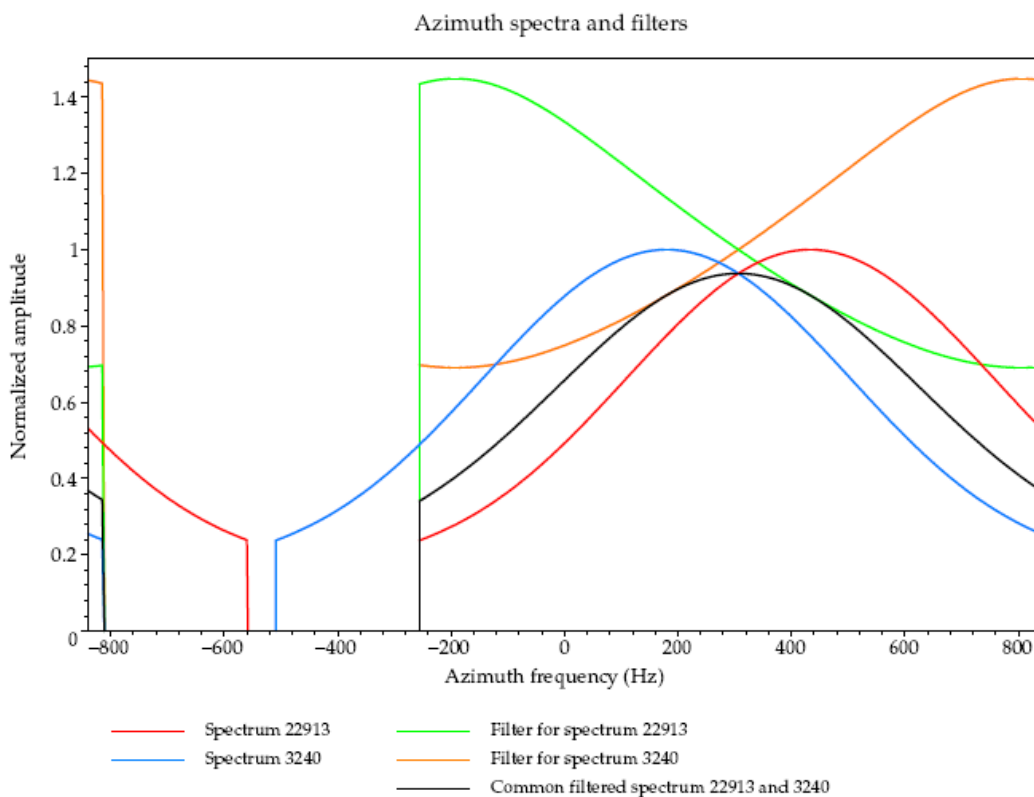
$$\tilde{\Pi}(f_{\text{PRF}}) = \begin{cases} 1 & \text{pro } f_{\text{PRF}} \in (W_{\text{am}} \cap W_{\text{as}}) \\ 0 & \text{pro ostatní} \end{cases} \quad (4.54)$$

tj. pokud se frekvenční pásma překrývají, tak jsou nenulové.

Výsledné přenosové funkce jsou totožné a dojde k redukci geometrické dekorelace. Na obrázku 4.13 je znázorněn teoretický tvar azimutového spektra a aplikace filtrů.



Obrázek 4.12: Zde je znázornění aplikace inverzní a nové Hammingovy váhové funkce. (Obrázek převzat z [26]).

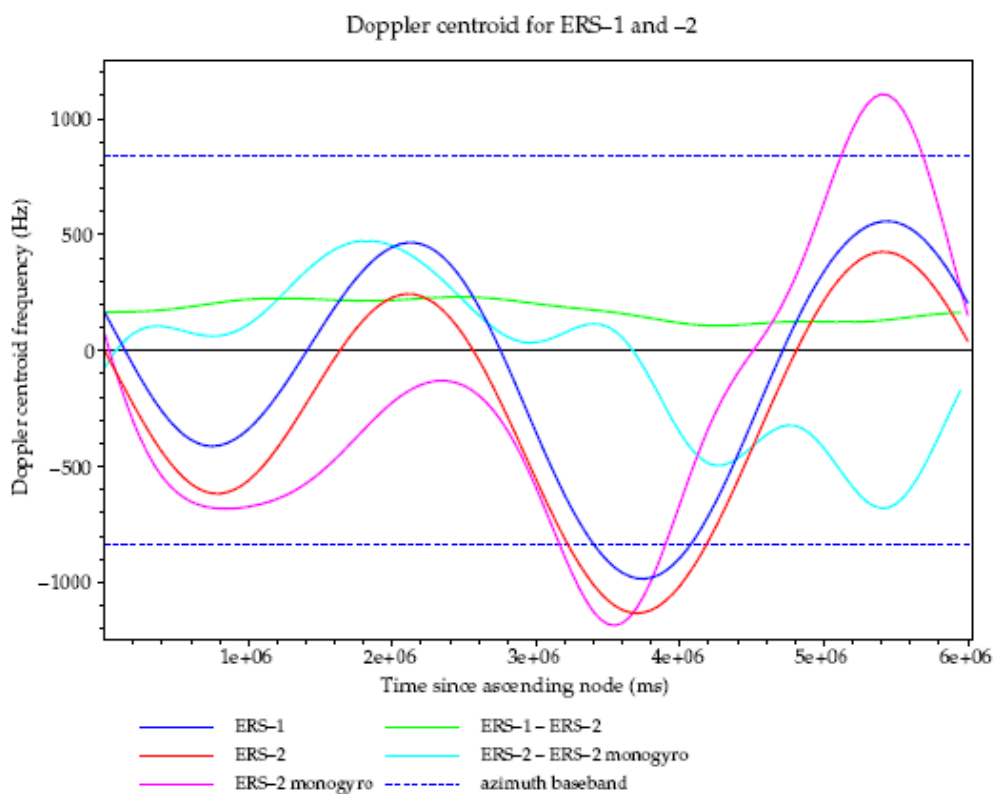


Obrázek 4.13: Na obrázku je znázorněný teoretický tvar spektra a aplikace jednotlivých filtrů. (Obrázek převzat z [26]).

## 4.5 Zdůvodnění potřeby filtrování v obou směrech

V případě satelitů ERS je řízení paprsku a polohy kontrolováno pomocí tří gyroskopů. U ERS-1 všechny tři gyroskopy fungovaly až do konce své životnosti 10.3.2000. Díky této kontrole vykazují všechny snímky podobný průběh frekvence Dopplerova centroidu.

Během první části životnosti satelitu ERS-2 vykazovala frekvence Dopplerova centroidu podobný průběh jako u ERS-1, pouze byla snížena přibližně o 250 Hz. Později se však vyskytly problémy se dvěma ze tří gyroskopů a od 7. dubna 2000 funguje pouze s jedním gyroskopem, díky čemuž frekvence Dopplerova centroidu vykazuje vůči ERS-1 větší odlišnost (obrázek 4.14).



Obrázek 4.14: Na obrázku je znázorněn průběh frekvence Dopplerova centroidu jako funkce času pro ERS-1, ERS-2 a ERS-2 s jedním gyroskopem. Dále jsou zde ukázány rozdíly mezi Dopplerovými centroidy ERS-1 a ERS-2 a mezi ERS-2 se třemi gyroskopy a ERS-2 s jedním gyroskopem. Obrázek je převzat z [26], přičemž výpočet byl proveden z koeficientů Fourierovy transformace z ESA.

Interferogramy mohou být vypočteny z párů ERS-1, ERS-2 snímků nebo kombinovaných párů ERS-1/2. Použití kombinovaných párů pořízených v tandem misích je zvlášť atraktivní kvůli svému jednodennímu intervalu, díky čemuž je zredukována časová dekorelace. Jestliže jsou použity páry ERS-1 nebo ERS-2, tak časový interval mezi snímky je celočíselný násobek 35 dní a časová dekorelace tak bude vyšší než u tandem párů. Jelikož průměrná frekvence Dopplerova centroidu ERS-2

může být velmi odlišná od ERS-1, filtrování v azimutu je užitečné a zvláště v případě tandem mise se doporučuje.

Velikost kolmé základny se pohybuje od několika desítek metrů až po kritickou základnu. Pokud je velikost kolmé základny do 200 m, což je časté u párů ERS-1 či ERS-2, důsledek filtrování není zas tak znatelný. Naopak v případě kombinovaných párů ERS-1/2 velikost kolmé základny přesahuje 300 m a filtrování ve směru range znatelně zlepšuje koherenci mezi snímky a je důležité.

Jestliže je základna příliš velká a terén vykazuje topografii, pak proces koregistrace (přiřazení slave snímku na master snímek) je komplikovaný, jelikož frekvence proužků se mění na základě lokálního terénního sklonu. Jistou možností, jak zlepšit proces koregistrace, je provedení předfiltrování ve směru range společně s azimutovým filtrováním. Po výpočtu koregistrace je pak opět provedeno filtrování ve směru range, což vede ke zlepšení koherence.

## 5. Analýza vlivu filtrace spektra

V předchozích kapitolách byly teoreticky zdůvodněny rozdíly ve frekvencích mezi oběma snímky ve směru range i azimutu a tudíž i nutnost provést spektrální filtrování v obou směrech. V následující kapitole se pokusím ověřit výše uvedenou teorii na vybraných snímcích ze satelitů ERS-1/2. Interferometrické zpracování jednotlivých variant bylo provedeno v programu DORIS. Pro posouzení vlivu filtrace spektra byly vypočteny interferogramy bez filtrování, s filtrováním, pouze s filtrováním ve směru azimutu a pouze s filtrováním ve směru range. Pro posouzení zlepšení koherence byly pomocí programu MATLAB vytvořeny histogramy koherence.

### 5.1 DORIS (Delft Object Oriented Interferometric Software)

Pro interferometrické zpracování je použit software *DORIS*, který je od roku 1998 vyvíjený na Univerzitě v Delftu v Holandsku. Projekt začal v rámci skupiny DEOS (Delft institute for Earth - Oriented Space research). Jedná se o open-source program, naprogramovaný v jazyce C++, což umožňuje přístup ke zdrojovému kódu a možnost jeho úpravy dle potřeb uživatele.

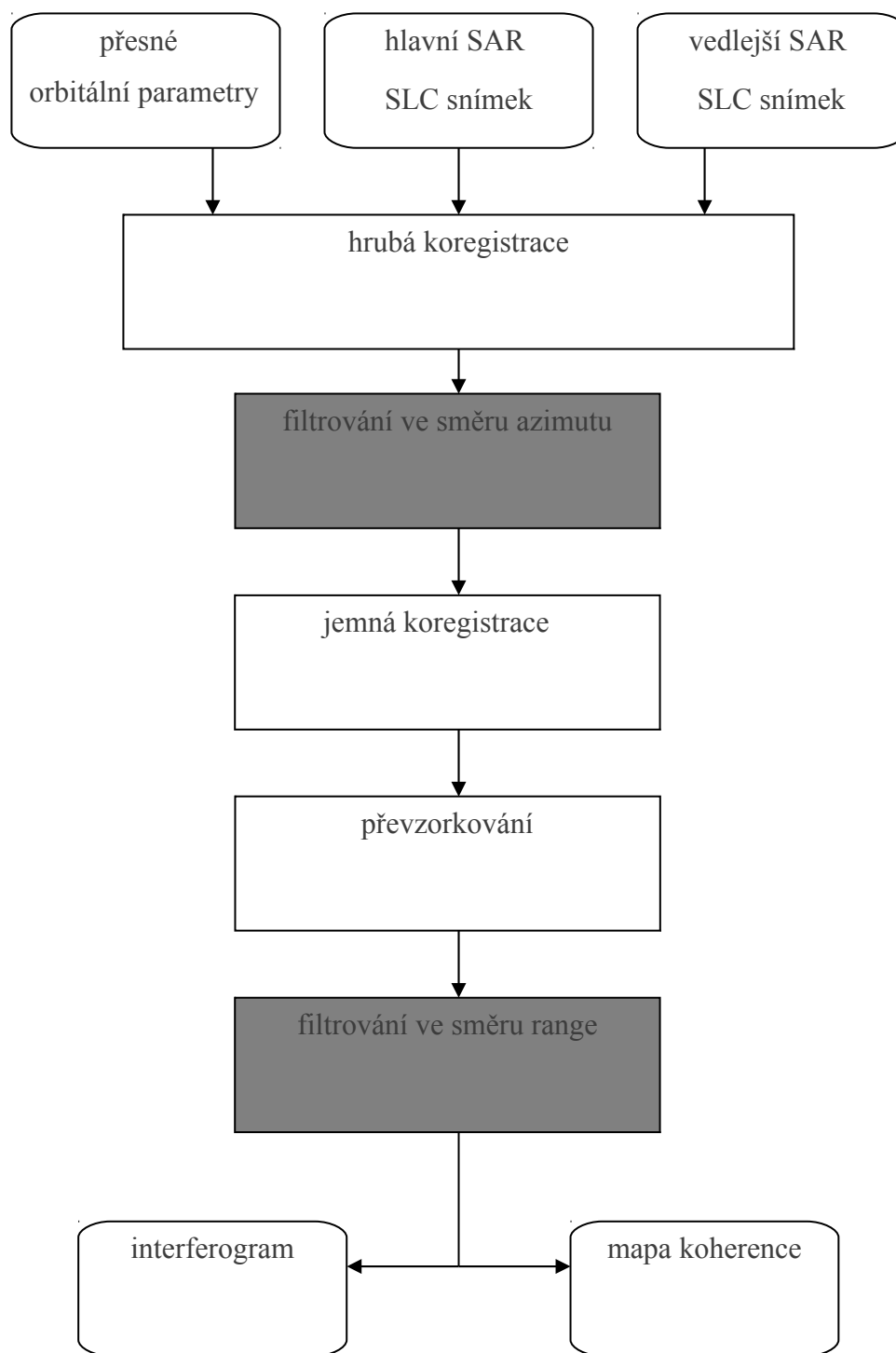
Vývoj je proveden na HP - Unix platformě, jako defaultní kompilátor je použit GNU Compiler, který je k dispozici na většině platform. V případě operačního systému Windows však mohou nastat problémy například s knihovnamy.

DORIS umožňuje zpracovávat základní kroky interferometrického radarového zpracování pomocí jednotlivých modulů. Základem programu je jeden hlavní program a samostatné moduly, které se v rámci tohoto programu zpracovávají. Jednotlivé důležité parametry se zapisují do tří ASCII souborů, založených pro interferogram a pro hlavní a vedlejší snímky. Jednotlivé moduly navazují na předchozí výsledky a zapisují nové informace nahrazením starých, popřípadě doplněním stávajících dat. Všechny výsledky jsou uloženy v binárním formátu, které si lze prohlédnout použitím skriptu *cpxfiddle*, čímž se převedou do formátu obrazu (tj. formát *sunraster*).

DORIS slouží pro zpracování základních úloh interferometrie, dále však používá jednoúčelové programy, vztahující se ke konkrétnímu problému. Například program *GETORB* pro získání přesných záznamů orbitálních dat pro ERS, *SNAPHU* pro rozbalení fáze. Pro vizualizaci výsledného digitálního modelu terénu či posunů je možné použít software *GRASS*.



### 5.1.1 Stručný popis zpracování dvou snímků



Obrázek 5.1: Schéma zájmové oblasti. Zvýrazněné prvky jsou předmětem diplomové práce.

Na začátku jsou dva "ostré" radarové obrazy tzv. *SLC (Single Look Complex)*. "Ostré" znamená, že prošly předzpracováním signálu (např. zaostření na Dopplerův centroid).

- **Koregistrace a filtrování ve směru azimutu**

Zpracování probíhá systémem přiřazování vedlejšího snímku na hlavní snímek, tj. pixel na prvním snímku musí přesně odpovídat pixelu na druhém snímku.

Nejprve se provede přibližný výpočet na základě známých orbitálních parametrů (dráha družice, absolutní poloha antény) s přesností několika pixelů. V druhém kroku následuje *hrubá koregistrace (coarse coregistration)* tak, že se srovnají obrazy v aktuálním stavu (pomocí interpolace amplitud obrazů). Následuje *filtrování ve směru azimutu (azimuth filtering)*, sloužící k odstranění vlivu posunů Dopplerových centroidů obou snímků. Ve třetím kroku se provede *jemná koregistrace (fine coregistration)* pomocí „oversampling“, tj. výpočet posunů ve velkém množství malých políček, což umožňuje provést výpočet se subpixelovou přesností.

Výsledkem jsou pak páry odpovídajících si pixelů ve formě vektorů posunutí. Pozice pixelu na vedlejším snímku pak odpovídá pozici pixelu na hlavním snímku s přičtením posunu.

- **Filtrování ve směru range**

Následuje *filtrování ve směru range (range filtering)*. Odstraní se nepřekrývající se části spektra vlivem snímkování pod nepatrně rozdílnými úhly pohledu.

- **Převzorkování**

Posuny z jednotlivých částí snímku s různou korelací jsou nyní proloženy polynomickou funkcí nízkého řádu. Po výpočtu koeficientů polynomické funkce je vedlejší snímek převzorkován (*resample*) na hlavní snímek.

- **Tvorba interferogramu a koherenční mapy**

Pomocí komplexně sdruženého násobení se provede odečtení fází obou korespondujících snímků. Výsledkem je interferogram. Současně je možné vypočítat koherenční mapu. Na jejím základě lze studovat vývoj sledovaného území v čase a provádět automatické analýzy změn např. ve využívání půdy nebo v oblasti lesního hospodářství.

Kroky interferometrického zpracování, které následují a mají za následek tvorbu digitálního modelu terénu či deformační mapy, nejsou předmětem této práce, proto zde nejsou uvedeny. Bližší informace lze nalézt např. [8], [9], [13], [20], [21], [27].

## 5.2 Výběr snímků a oblastí pro analýzu filtrace

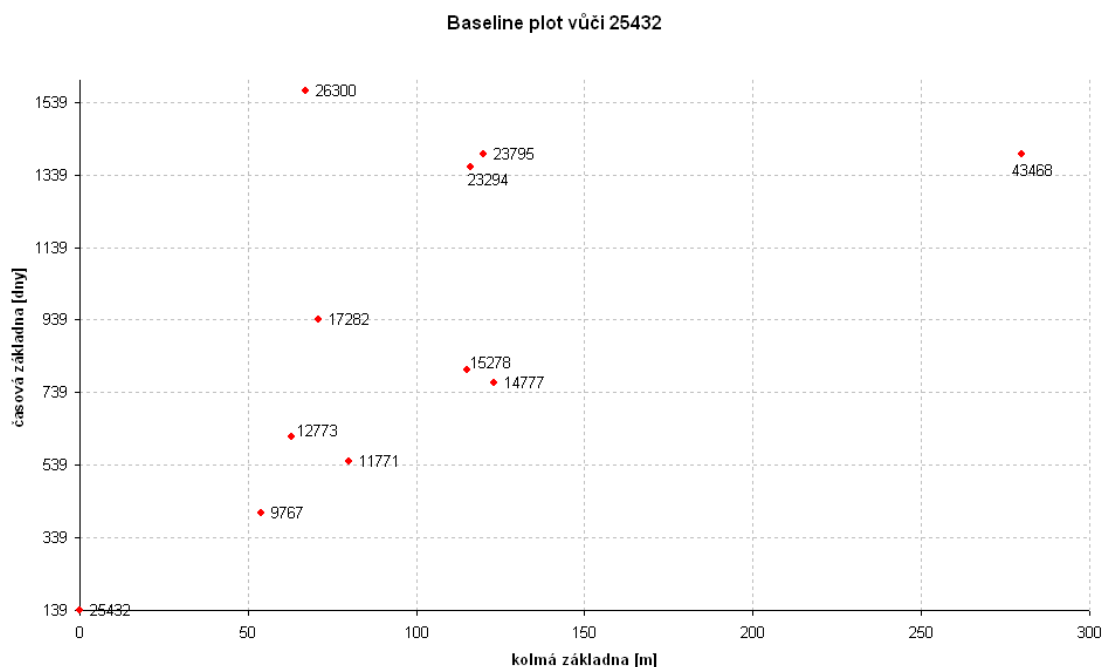
Pro testování jsem měla k dispozici snímky ze satelitu ERS-1/2 pro track 394 a frame 2583 (tabulka 5.1, obrázek 5.2). Snímky obsahují oblast severozápadní části České republiky a přilehlou část Spolkové republiky Německo. Zde jsem provedla výběr vhodných snímků a vytvořila interferometrické páry s různými parametry pro filtrování, tj. velikost rozdílu frekvencí Dopplerova centroidu, velikost kolmé základny a časová základna.

Dalším důležitým parametrem je výběr lokality na snímku. Jelikož je posuzována filtrace spektra vlivem snímací geometrie, snažila jsem se vybrat lokality s neměnnými spektrálními parametry. Vybrala jsem dvě oblasti o rozměrech 1024 x 1024 pixelů. Jako oblast A jsem vybrala Mosteckou uhelnou pánev, protože dle radarového snímku předpokládám vysokou odrazivost. Jako oblast B jsem vybrala město Drážďany ve Spolkové republice Německo. Tato oblast byla vybrána kvůli terénu s konstantním sklonem (obrázek 5.3).

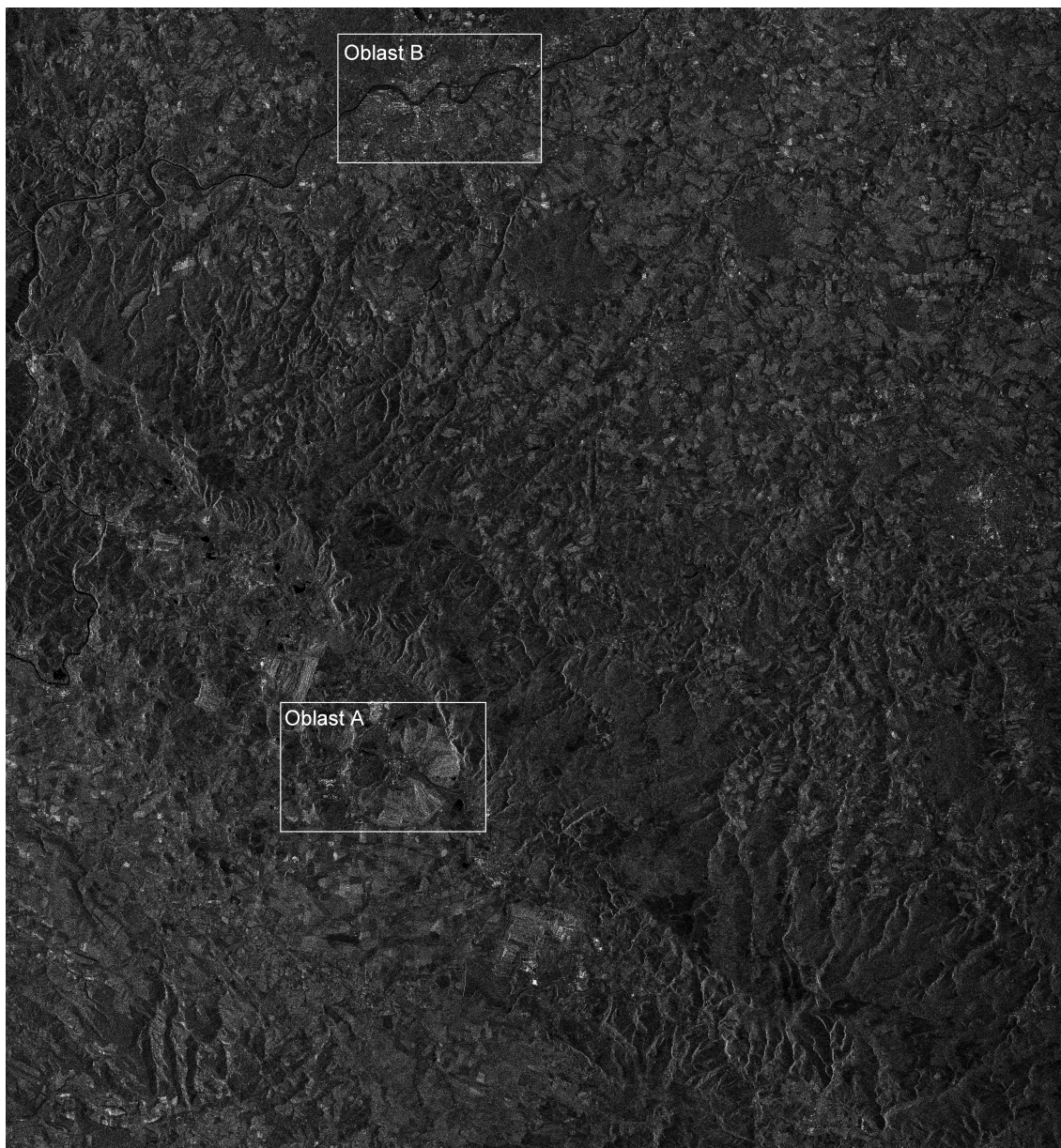
Pro znázornění vlivu filtrace spektra (kapitola 5.3) jsem vybrala tandem snímek, kombinované páry ERS-1/2 snímků s časovými základnami 34 a 176 dní a ERS-2 páry s časovými základnami 35, 175 a 210 dní. Ke každému případu jsou uvedeny základní informace o snímcích (zdrojem jsou výstupní soubory programu DORIS), teoretický výpočet frekvenčního posunu ve směru range a azimutu a histogram koherence pro znázornění koherence v interferogramech bez filtrování, s filtrováním, s filtrováním ve směru azimutu a s filtrováním ve směru range. Výřezy z jednotlivých interferogramů mají rozměr 400 x 300 pixelů.

<b>Snímek</b>	<b>Satelit</b>	<b>Datum</b>	<b>Dopplerův centroid [Hz]</b>	<b>Kolmá základna vůči 25432 [m]</b>
25432	ERS-1	26.5.1996	463,812	0
09767	ERS-2	3.3.1997	253,631	54
11771	ERS-2	21.7.1997	212,738	80
12773	ERS-2	29.9.1997	216,350	63
14777	ERS-2	16.2.1998	186,321	123
15278	ERS-2	23.3.1998	177,379	115
17282	ERS-2	10.8.1998	215,577	71
23294	ERS-2	4.10.1999	217,405	116
23795	ERS-2	8.11.1999	280,202	120
43468	ERS-1	7.11.1999	452,189	280
26300	ERS-2	1.5.2000	-13,525	67

Tabulka 5.1: Základní parametry vybraných snímků pro track 394 a frame 2583.



Obrázek 5.2: V grafu, tzv. baseline plot, jsou znázorněny jednotlivé snímky. Na vodorovné ose je vynesena velikost kolmé základny vůči master snímku 25432, na svislé ose je vynesena časová základna pořizení snímků vůči hlavnímu snímku.



Obrázek 5.3: Na radarovém snímku 43468 jsem znázornila vybrané testovací oblasti. Oblast A zahrnuje Mosteckou uhelnou pánev, oblast B zahrnuje území města Drážďany. Vlivem směru letu družice je snímek vůči mapě zrcadlově otočený.

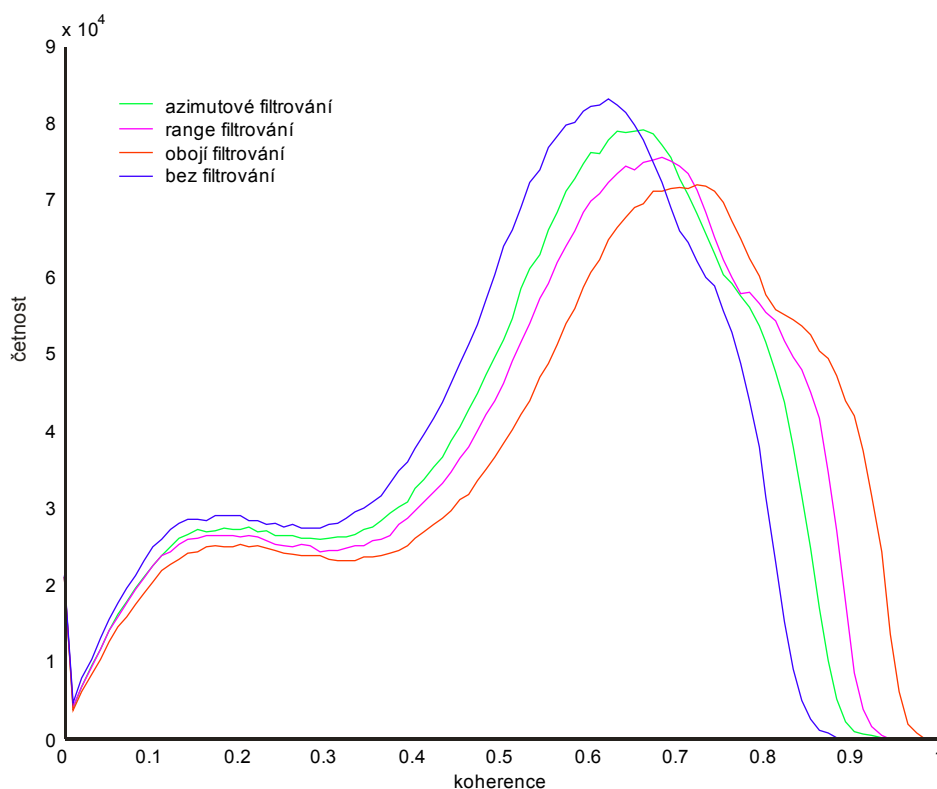
### 5.3 Vybrané interferometrické páry

#### 5.3.1 Interferometrický pár 43468 - 23795 (oblast A)

	Snímek	Datum	Satelit	$f_{DC}$
hlavní	43468	7.11.1999	ERS-1	452,189 Hz
vedlejší	23795	8.11.1999	ERS-2	280,202 Hz

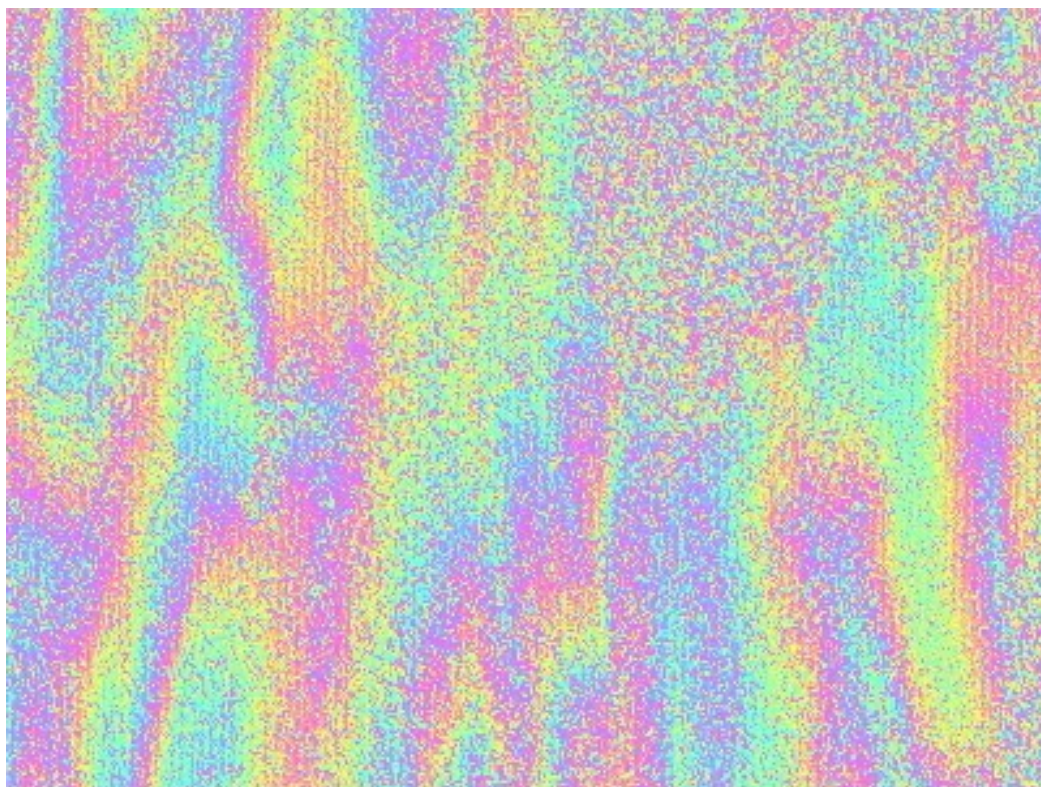
$B_{Temp}$	1 den
$B$	174,6 m
$B_n$	-164,4 m
$\theta_i$	22,2°
$q_A$	55,1 m

Teoretický výpočet			
$\Delta f_r$	2,510 MHz	$\Delta f_{DC}$	171,987 Hz
$\gamma_{range}$	0,838	$\gamma_{azimut}$	0,875
$m_{range}$	19,25 %	$m_{azimut}$	14,26 %

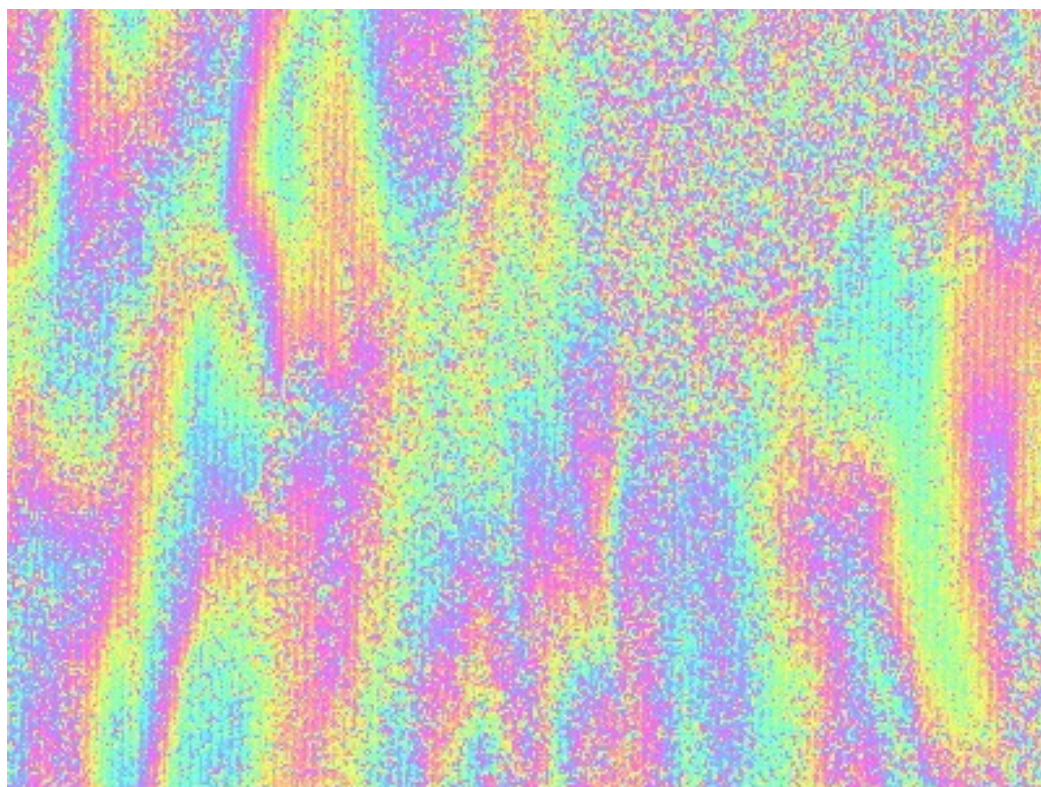


Obrázek 5.4: Histogram koherence pro interferometrický pár 43468 - 23795. Je zde znázorněn případ bez filtrování, s filtrováním, s filtrováním ve směru azimutu a s filtrováním ve směru range. Výřezy z jednotlivých interferogramů jsou uvedeny na obrázcích 5.5 - 5.8.



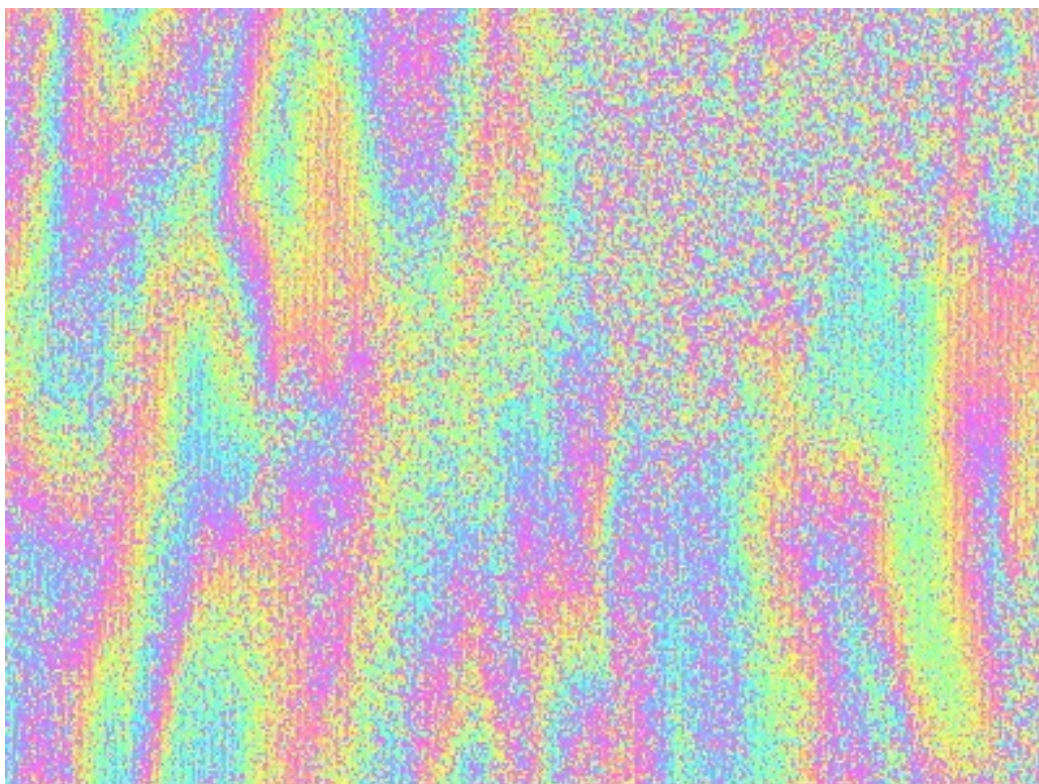


Obrázek 5.5: Interferogram bez filtrování pro interferometrický pár 43468 - 23795

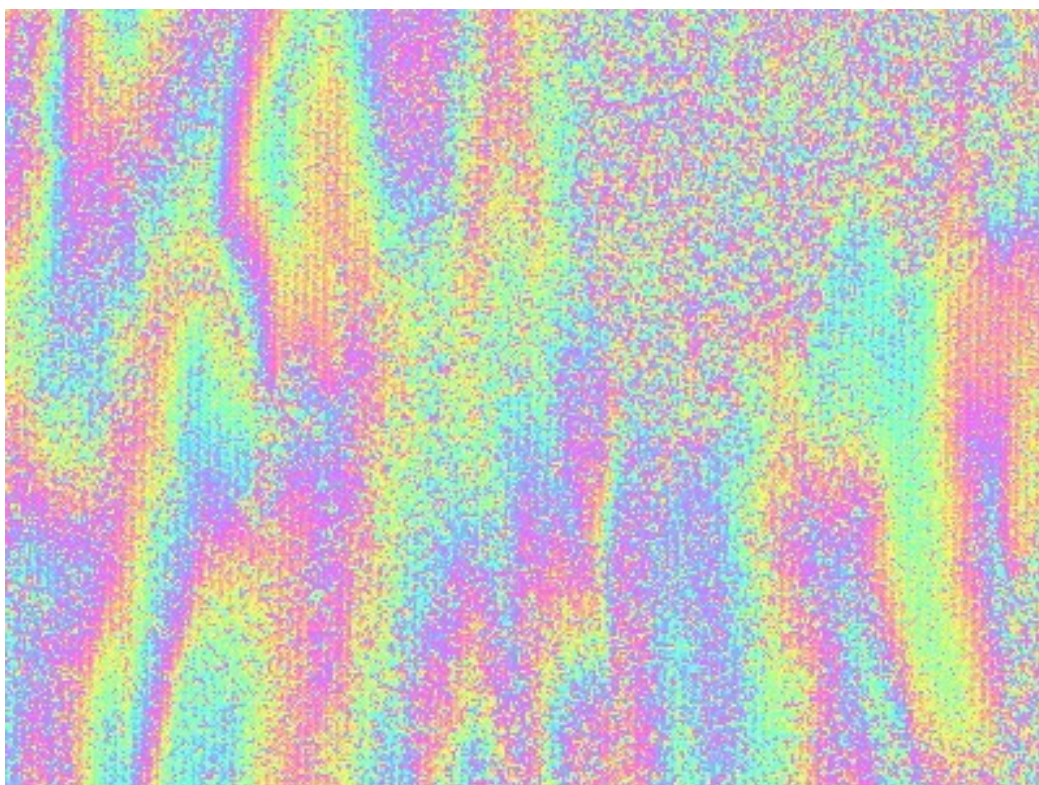


Obrázek 5.6: Interferogram s filtrováním v obou směrech pro interferometrický pár 43468 - 23795





Obrázek 5.7: Interferogram s filtrováním ve směru azimutu pro interferometrický pár 43468 - 23795



Obrázek 5.8: Interferogram s filtrováním ve směru range pro interferometrický pár 43468 - 23795

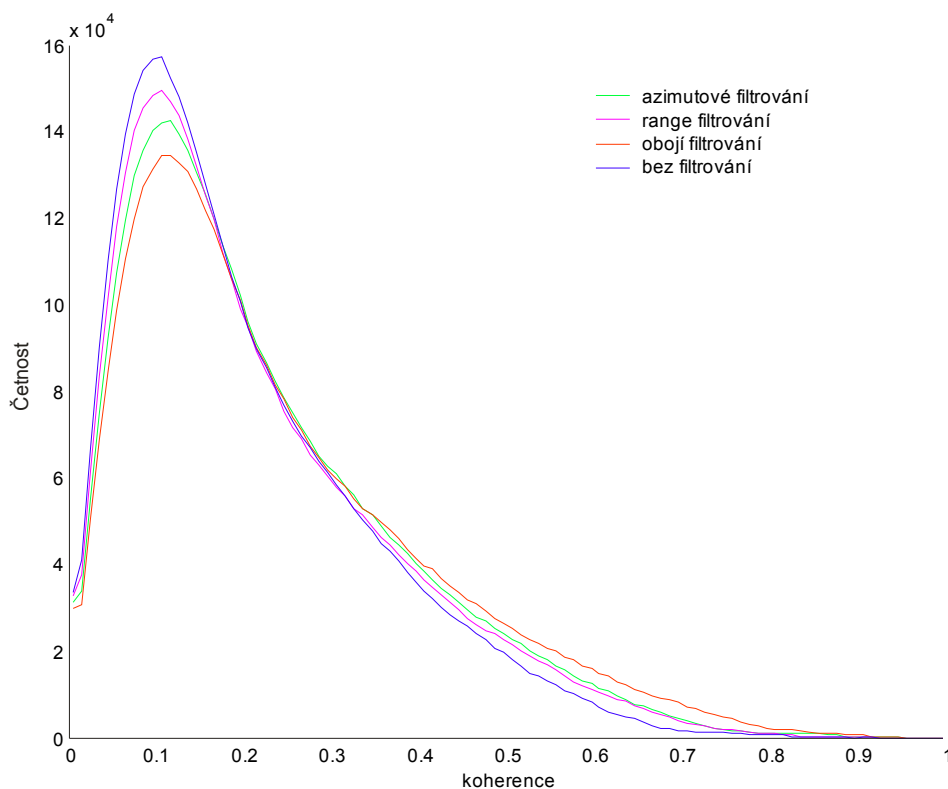


### 5.3.2 Interferometrický pár 23294 - 43468 (oblast A)

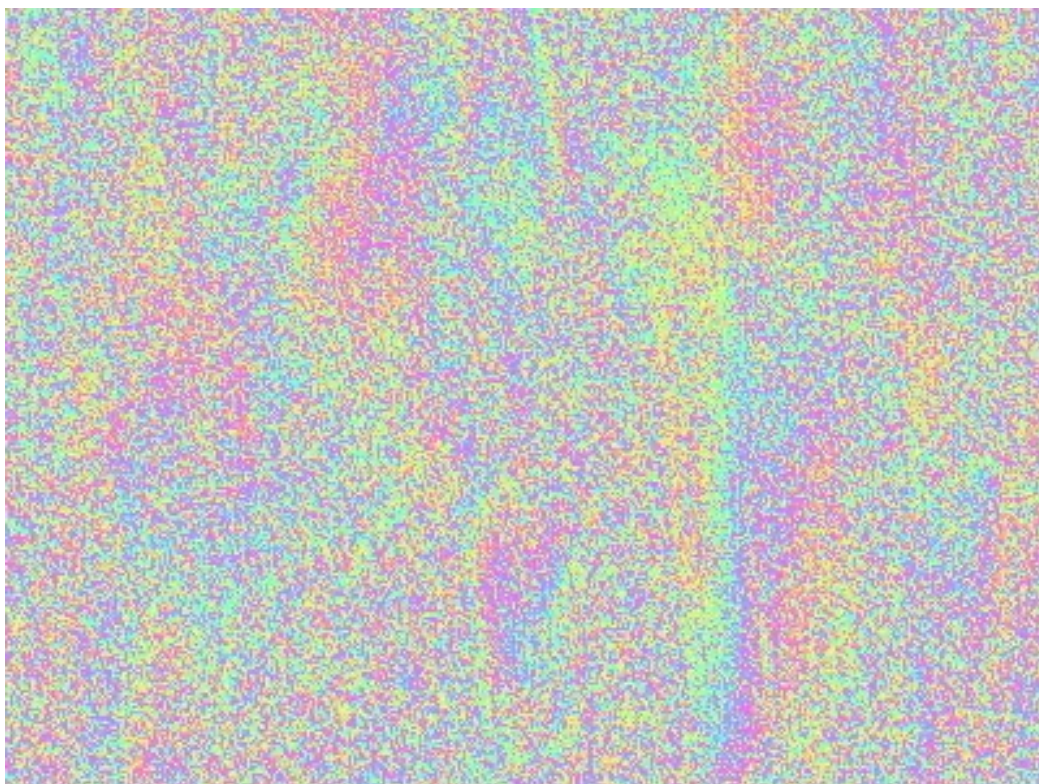
	Snímek	Datum	Satelit	$f_{DC}$
hlavní	23294	4.10.1999	ERS-2	217,405 Hz
vedlejší	43468	7.11.1999	ERS-1	452,189 Hz

$B_{Temp}$	34 dní
$B$	173,1 m
$B_n$	172,1 m
$\theta_i$	22,2°
$q_A$	-52,6 m

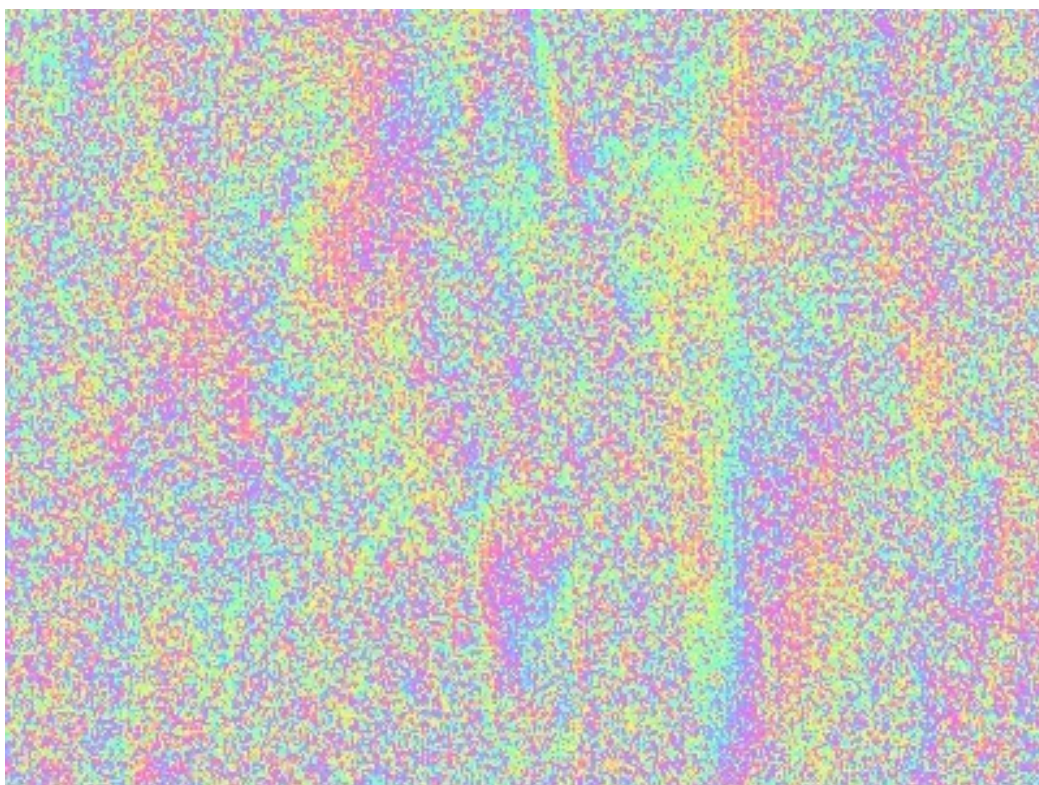
Teoretický výpočet			
$\Delta f_r$	2,628 MHz	$\Delta f_{DC}$	234,784 Hz
$\gamma_{range}$	0,831	$\gamma_{azimut}$	0,829
$m_{range}$	20,34 %	$m_{azimut}$	20,54 %



Obrázek 5.9: Histogram koherence pro interferometrický pár 23294 - 43468. Je zde znázorněn případ bez filtrování, s filtrováním, s filtrováním ve směru azimutu a s filtrováním ve směru range. Výřezy z jednotlivých interferogramů jsou uvedeny na obrázcích 5.10 - 5.13.

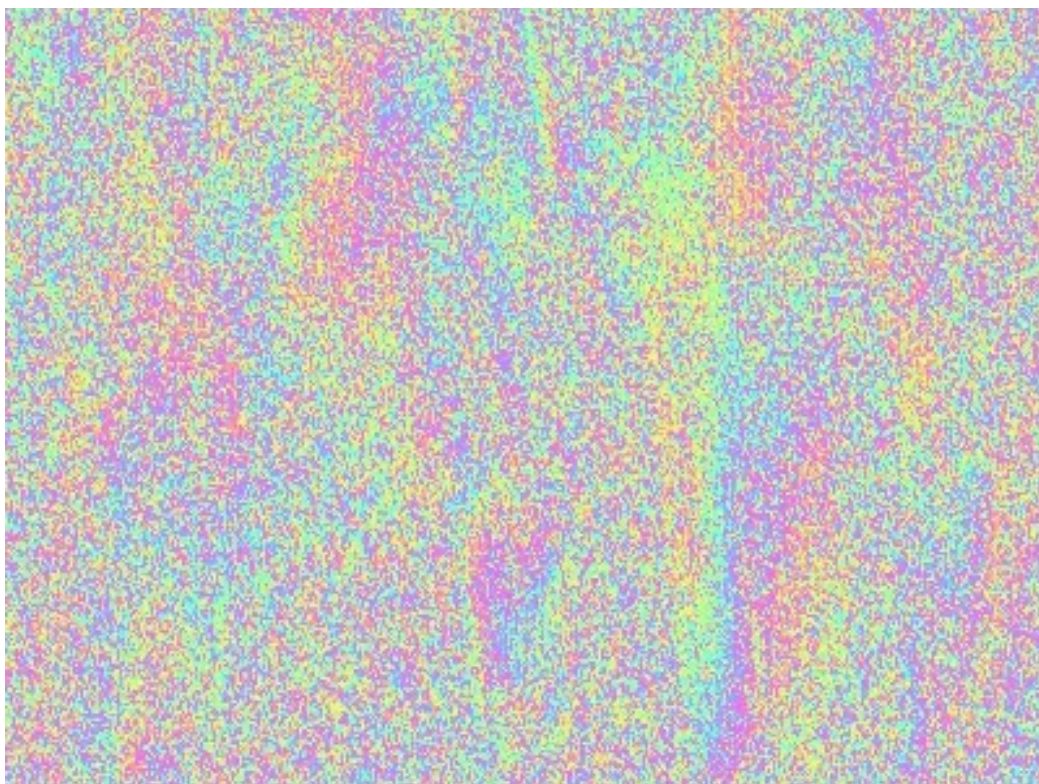


Obrázek 5.10: Interferogram bez filtrování pro interferometrický pár 23294 - 43468

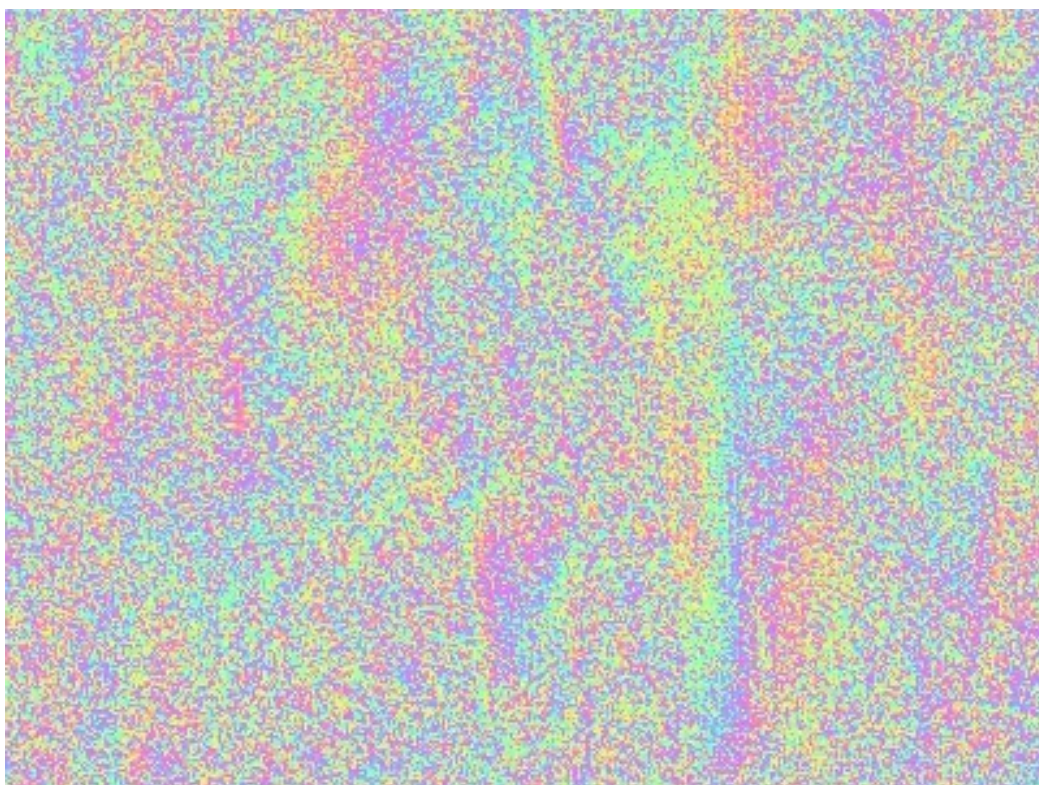


Obrázek 5.11: Interferogram s filtrováním v obou směrech pro interferometrický pár 23294 - 43468





Obrázek 5.12: Interferogram s filtrováním ve směru azimutu pro interferometrický pár 23294 - 43468



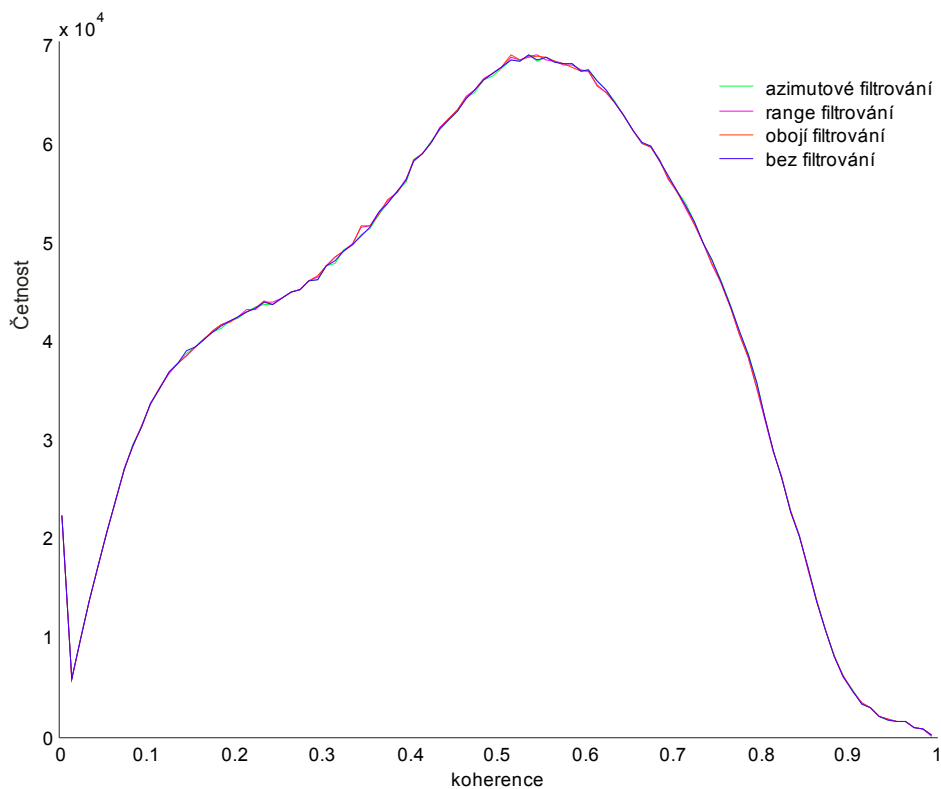
Obrázek 5.13: Interferogram s filtrováním ve směru range pro interferometrický pár 23294 - 43468

### 5.3.3 Interferometrický pár 14777 - 15278 (oblast A)

	Snímek	Datum	Satelit	$f_{DC}$
hlavní	14777	16.2.1998	ERS-2	186,321 Hz
vedlejší	15278	23.3.1998	ERS-2	177,379 Hz

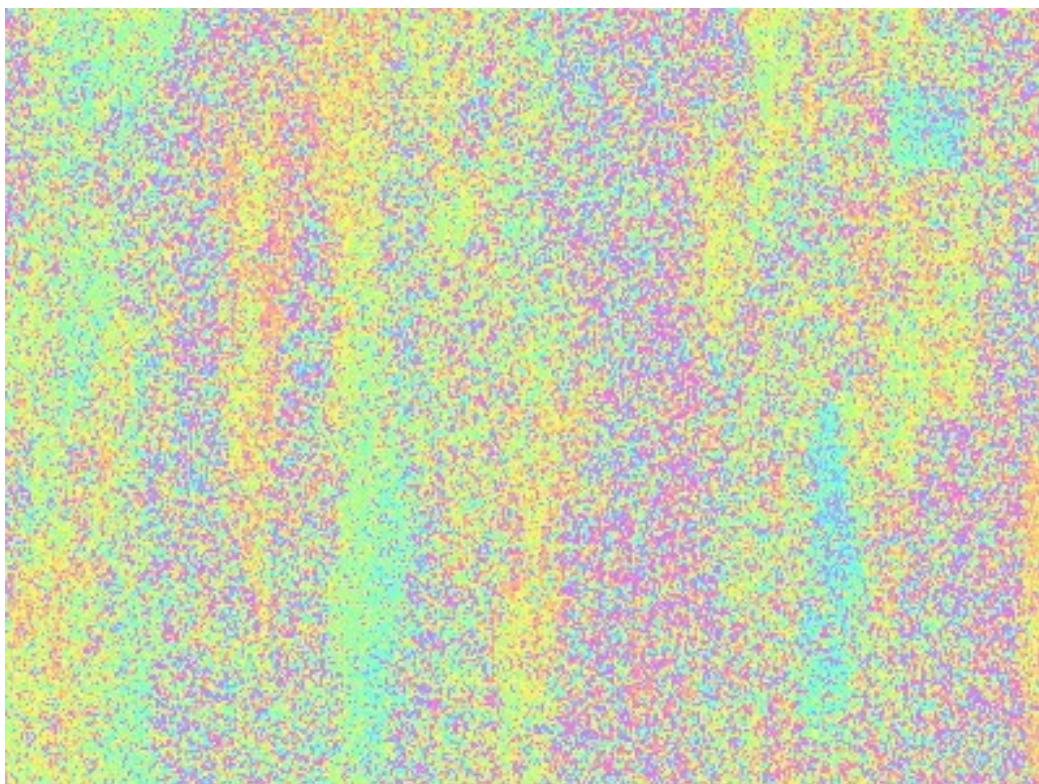
$B_{Temp}$	35 dní
$B$	59,4 m
$B_n$	-45,4 m
$\theta_i$	22,2°
$q_A$	199,6 m

Teoretický výpočet			
$\Delta f_r$	0,693 MHz	$\Delta f_{DC}$	8,942 Hz
$\gamma_{range}$	0,955	$\gamma_{azimut}$	0,993
$m_{range}$	4,66 %	$m_{azimut}$	0,65 %

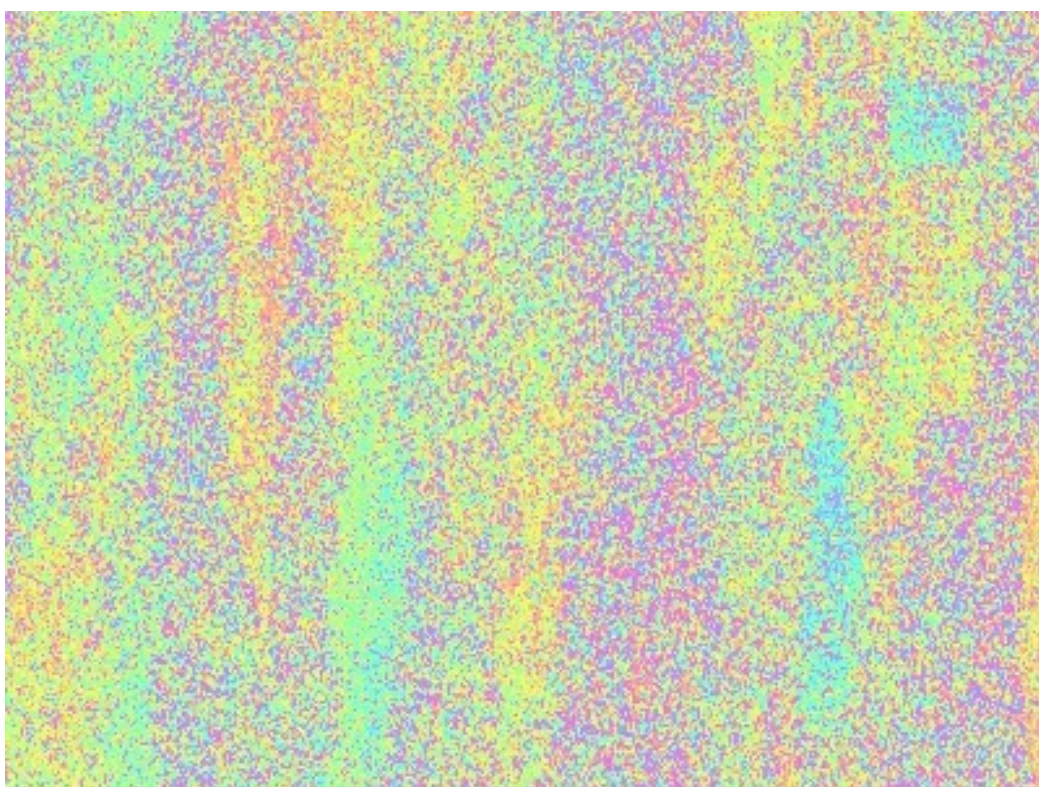


Obrázek 5.14: Histogram koherence pro interferometrický pár 14777 - 15278. Je zde znázorněn případ bez filtrování, s filtrováním, s filtrováním ve směru azimutu a s filtrováním ve směru range. Výřezy z jednotlivých interferogramů jsou uvedeny na obrázcích 5.15 - 5.18.



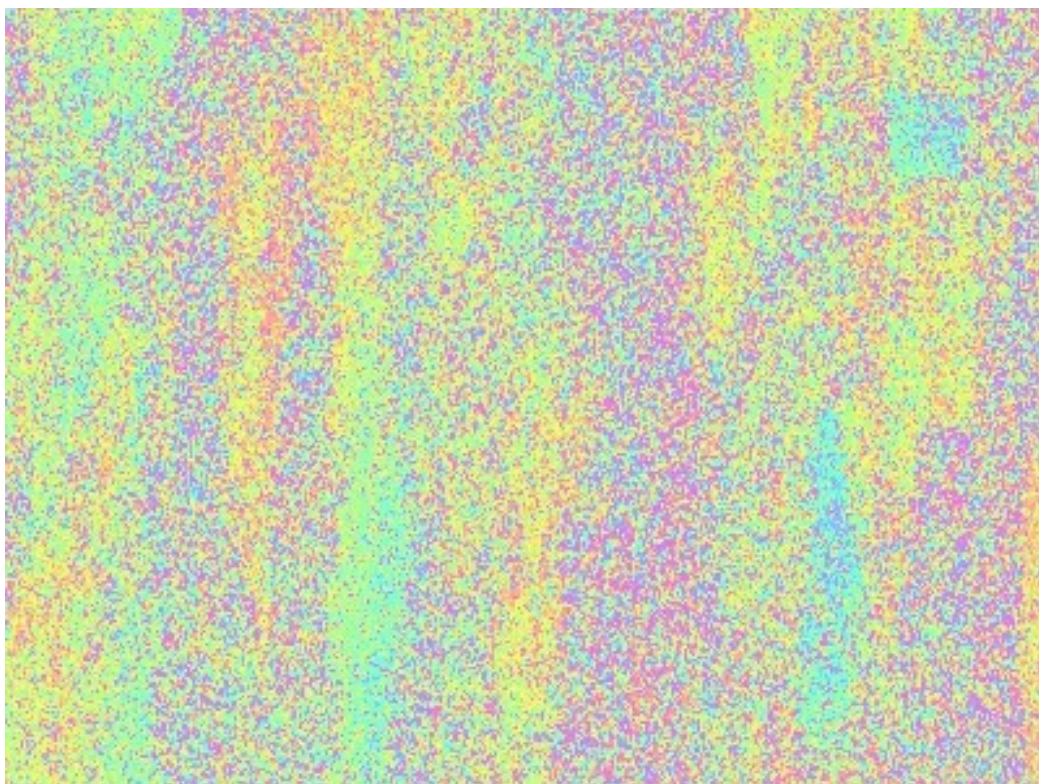


Obrázek 5.15: Interferogram bez filtrování pro interferometrický pár 14777 - 15278

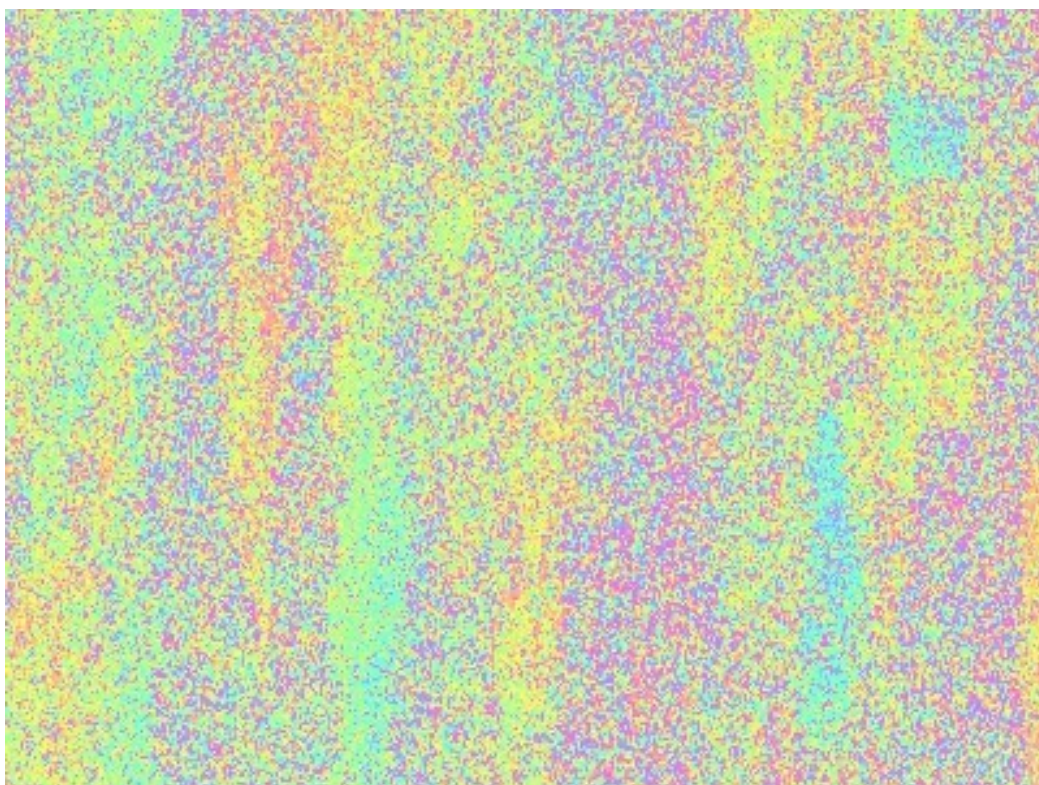


Obrázek 5.16: Interferogram s filtrováním v obou směrech pro interferometrický pár 14777 - 15278





Obrázek 5.17: Interferogram s filtrováním ve směru azimutu pro interferometrický pár 14777 - 15278



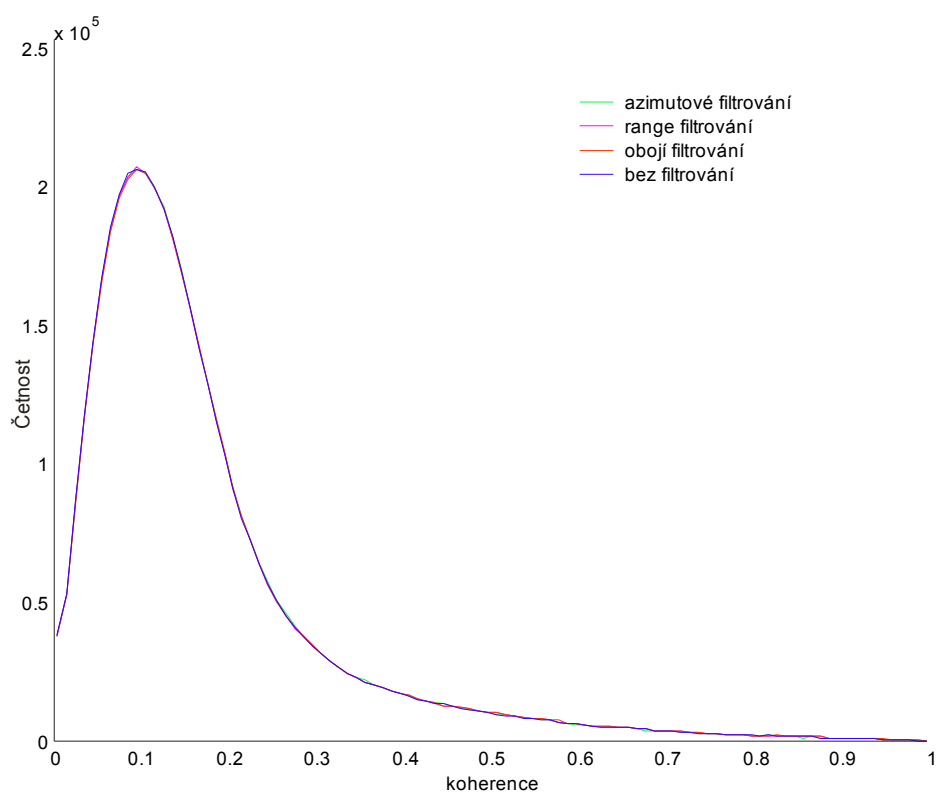
Obrázek 5.18: Interferogram s filtrováním ve směru range pro interferometrický pár 14777 - 15278

### 5.3.4 Interferometrický pár 17282 - 14777 (oblast A)

	Snímek	Datum	Satelit	$f_{DC}$
hlavní	17282	10.8.1998	ERS-2	215,577 Hz
vedlejší	14777	16.2.1998	ERS-2	186,321 Hz

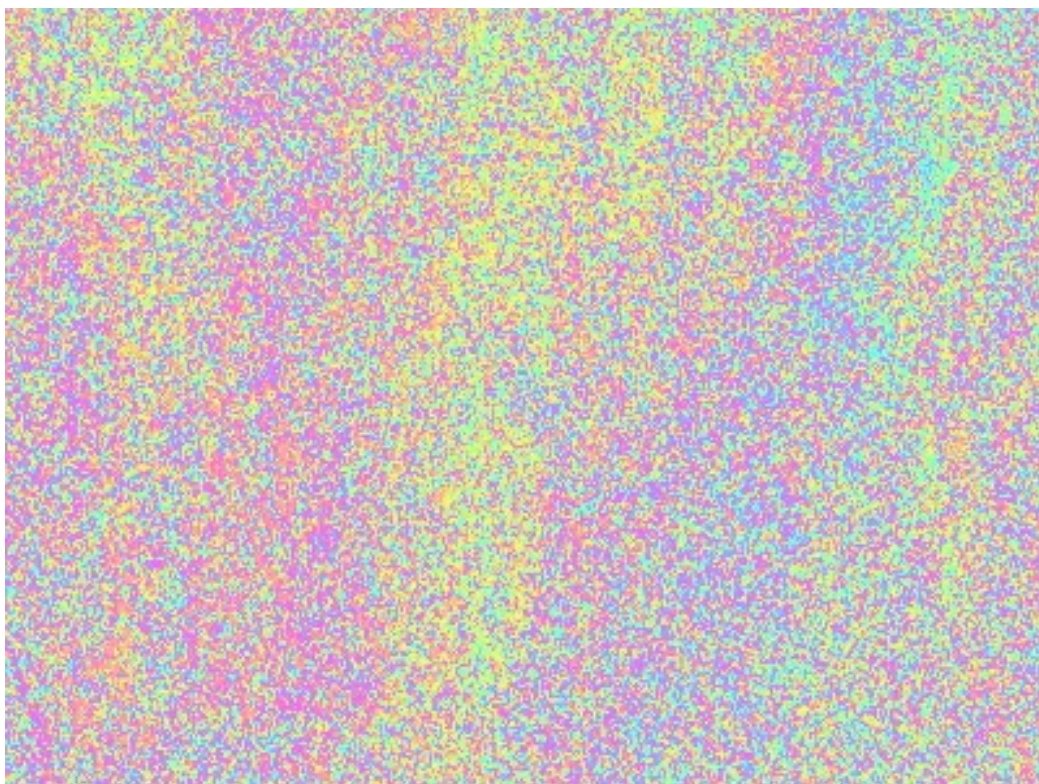
$B_{Temp}$	175 den
$B$	84,2 m
$B_n$	81,7 m
$\theta_i$	22,2°
$q_A$	-110,9 m

Teoretický výpočet			
$\Delta f_r$	1,247 MHz	$\Delta f_{DC}$	29,256 Hz
$\gamma_{range}$	0,919	$\gamma_{azimut}$	0,978
$m_{range}$	8,72 %	$m_{azimut}$	2,17 %

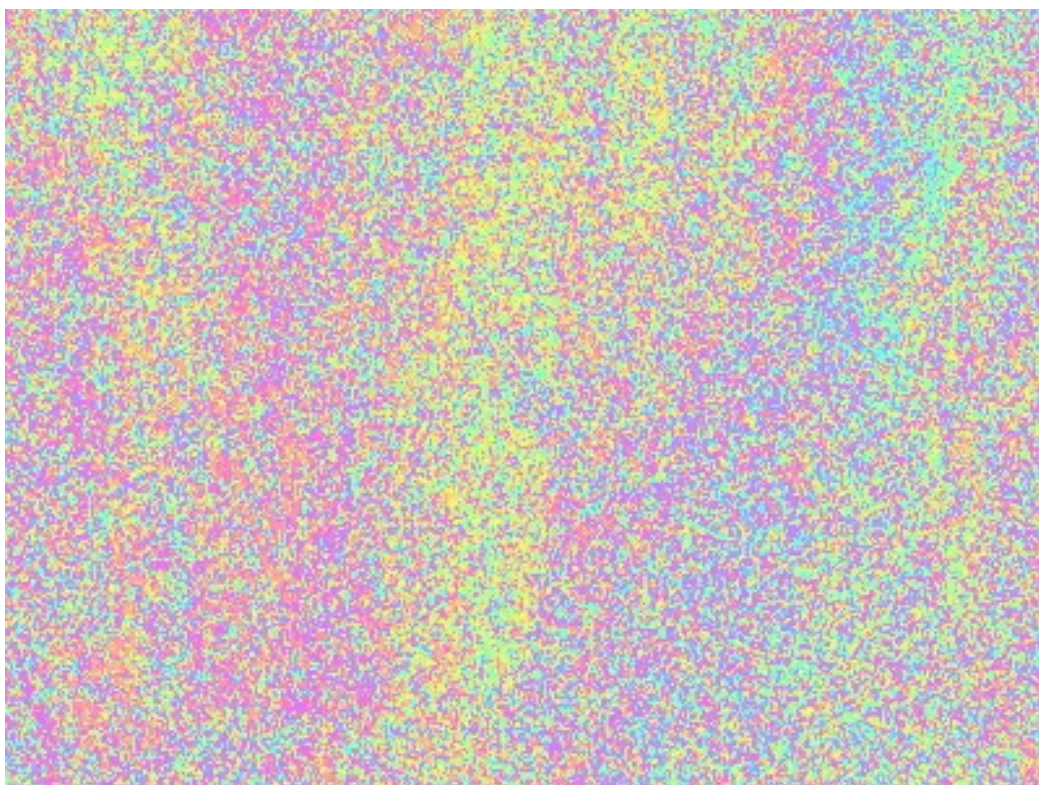


Obrázek 5.19: Histogram koherence pro interferometrický pár 17282 - 14777. Je zde znázorněn případ bez filtrování, s filtrováním, s filtrováním ve směru azimutu a s filtrováním ve směru range. Výřezy z jednotlivých interferogramů jsou uvedeny na obrázcích 5.20 - 5.23.



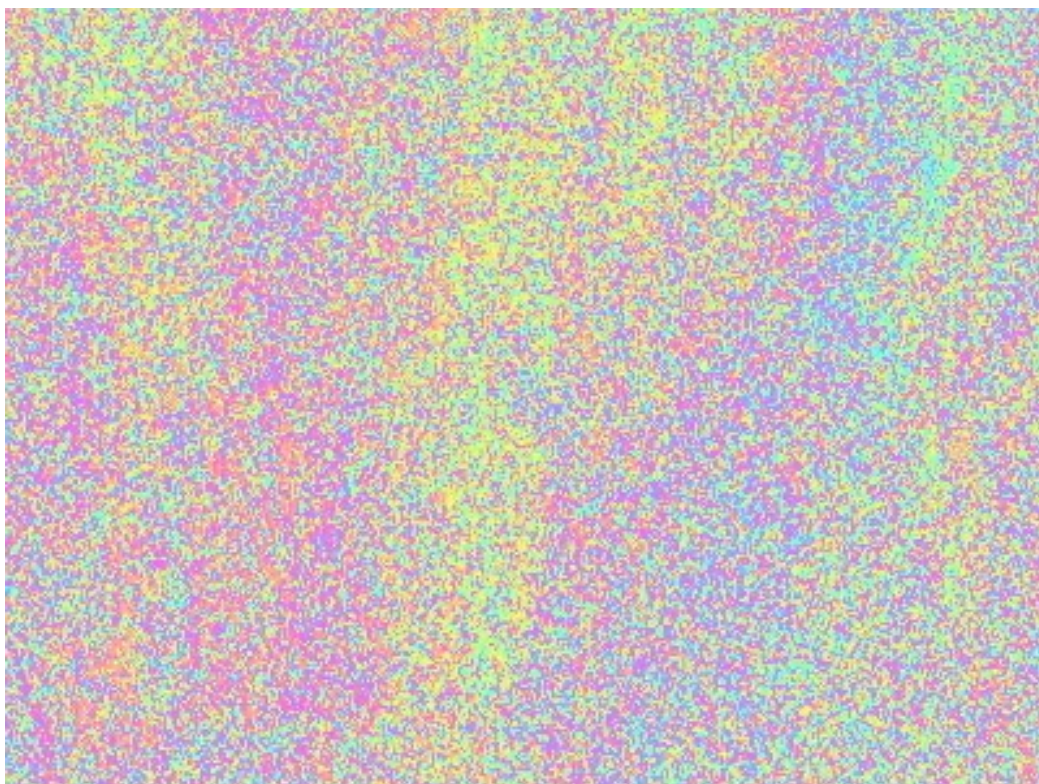


Obrázek 5.20: Interferogram bez filtrování pro interferometrický pár 17282 - 14777.

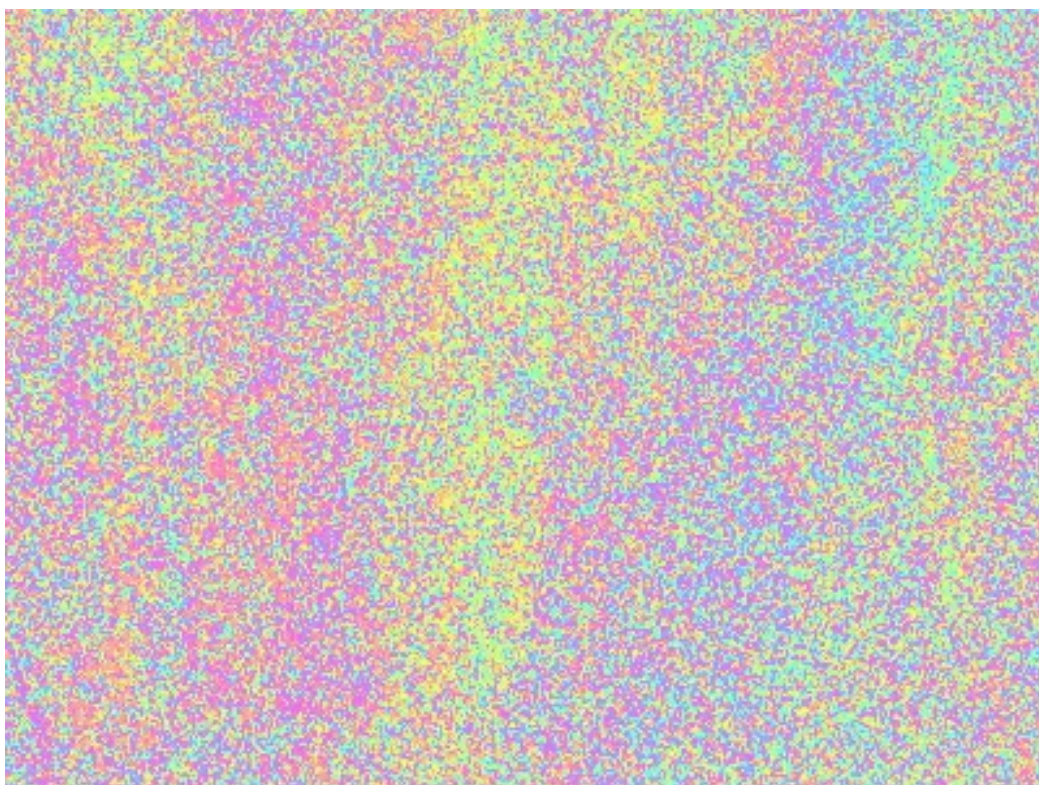


Obrázek 5.21: Interferogram s filtrováním v obou směrech pro interferometrický pár 17282 - 14777.





Obrázek 5.22: Interferogram s filtrováním ve směru azimutu pro interferometrický pár 17282 - 14777.



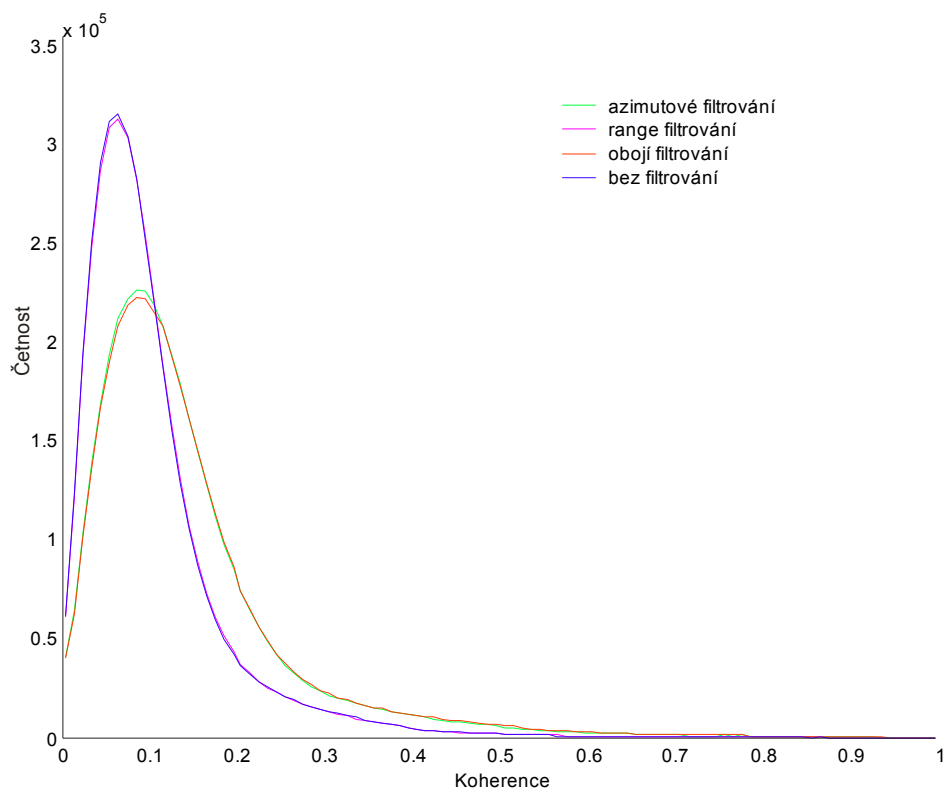
Obrázek 5.23: Interferogram s filtrováním ve směru range pro interferometrický pár 17282 - 14777.

### 5.3.5 Interferometrický pár 43468 - 26300 (oblast B)

	Snímek	Datum	Satelit	$f_{DC}$
hlavní	43468	7.11.1999	ERS-1	452,189 Hz
vedlejší	26300	1.5.2000	ERS-2	-13,525 Hz

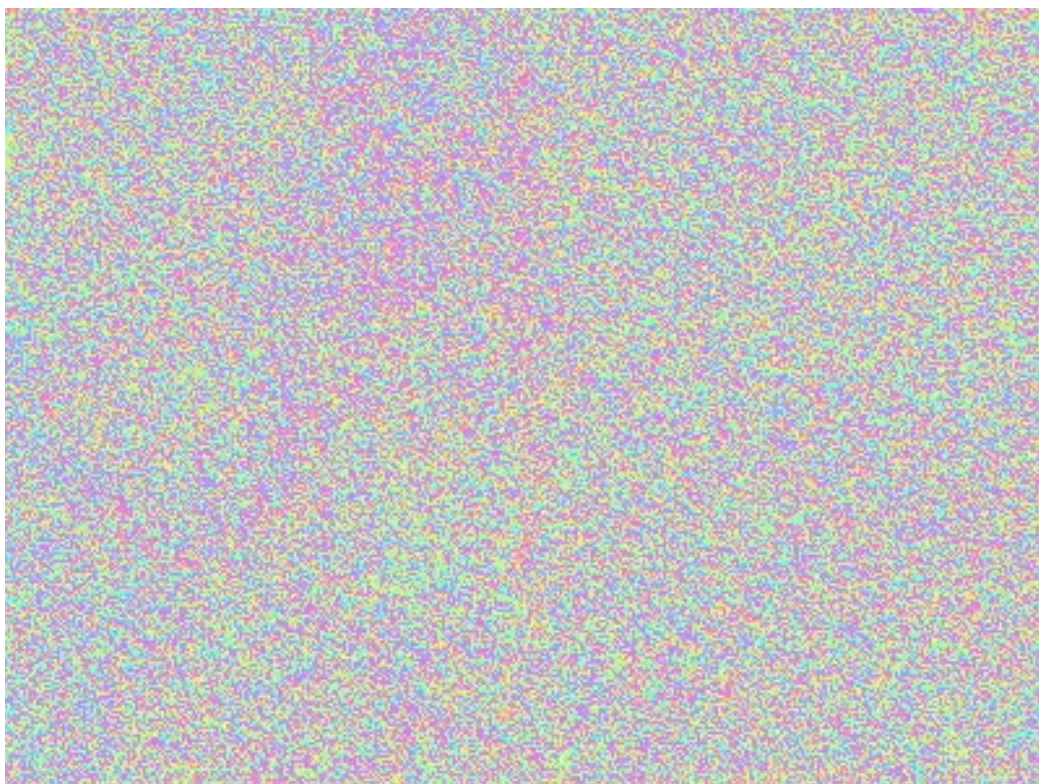
$B_{Temp}$	176 dní
$B$	239,9 m
$B_n$	-218,9 m
$\theta_i$	22,2°
$q_\Lambda$	41,4 m

Teoretický výpočet			
$\Delta f_r$	3,342 MHz	$\Delta f_{DC}$	465,714 Hz
$\gamma_{range}$	0,785	$\gamma_{azimut}$	0,662
$m_{range}$	27,38 %	$m_{azimut}$	51,05 %

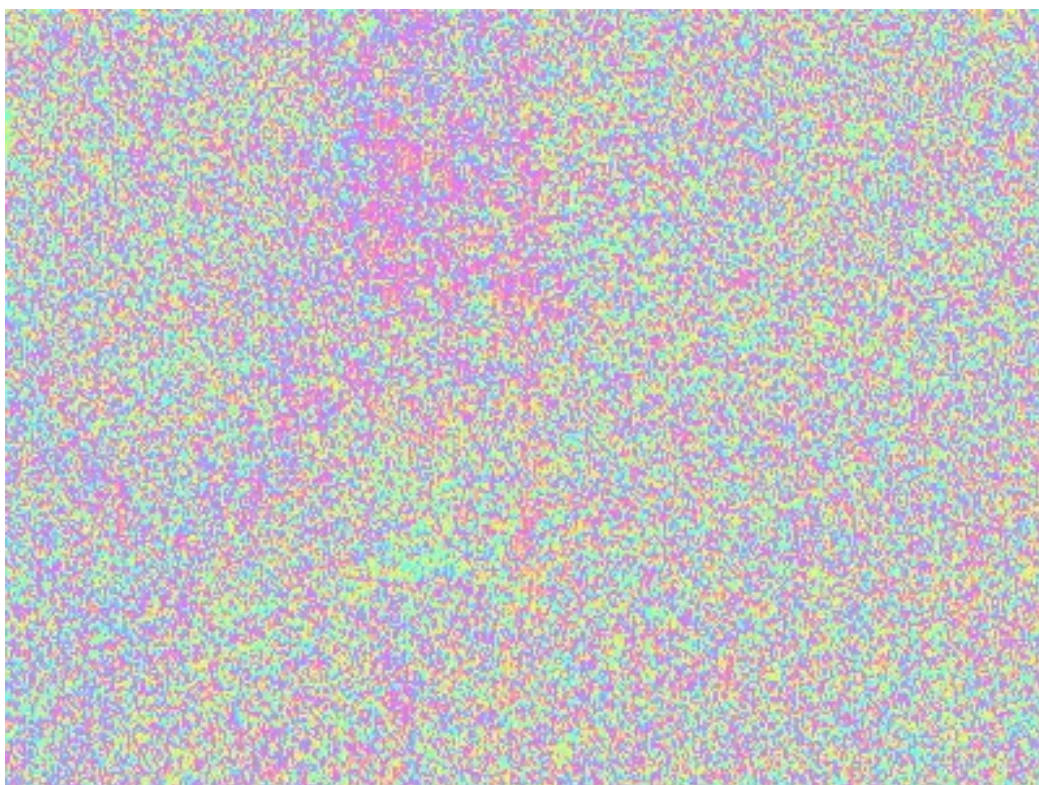


Obrázek 5.24: Histogram koherence pro interferometrický pár 43468 - 26300. Je zde znázorněn případ bez filtrování, s filtrováním, s filtrováním ve směru azimutu a s filtrováním ve směru range. Výřezy z jednotlivých interferogramů jsou uvedeny na obrázcích 5.25 - 5.28.



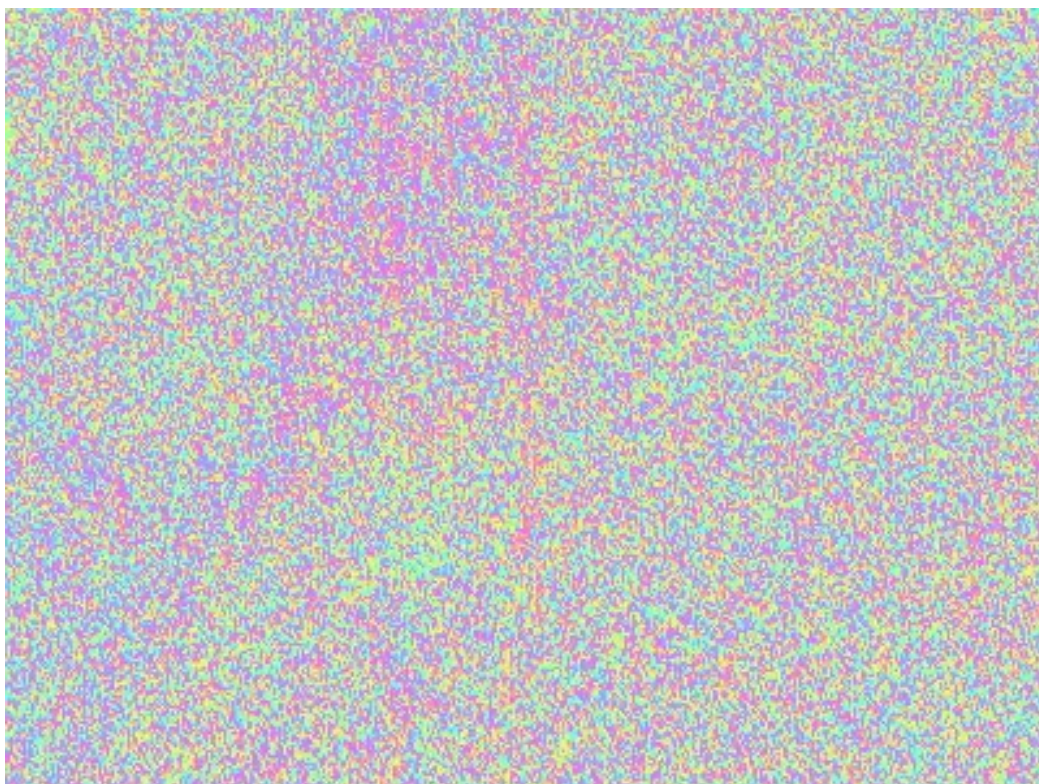


Obrázek 5.25: Interferogram bez filtrování pro interferometrický pár 43468 - 26300.

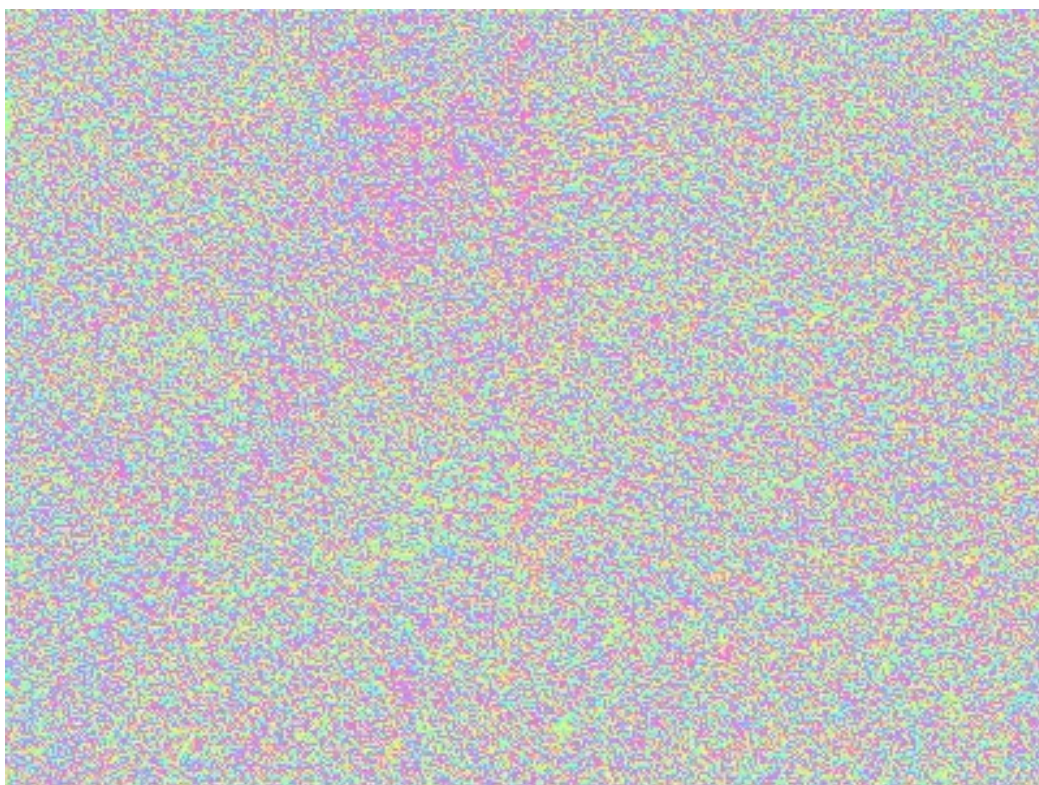


Obrázek 5.26: Interferogram s filtrováním v obou směrech pro interferometrický pár 43468 - 26300.





Obrázek 5.27: Interferogram s filtrováním ve směru azimutu pro interferometrický pár 43468 - 26300.



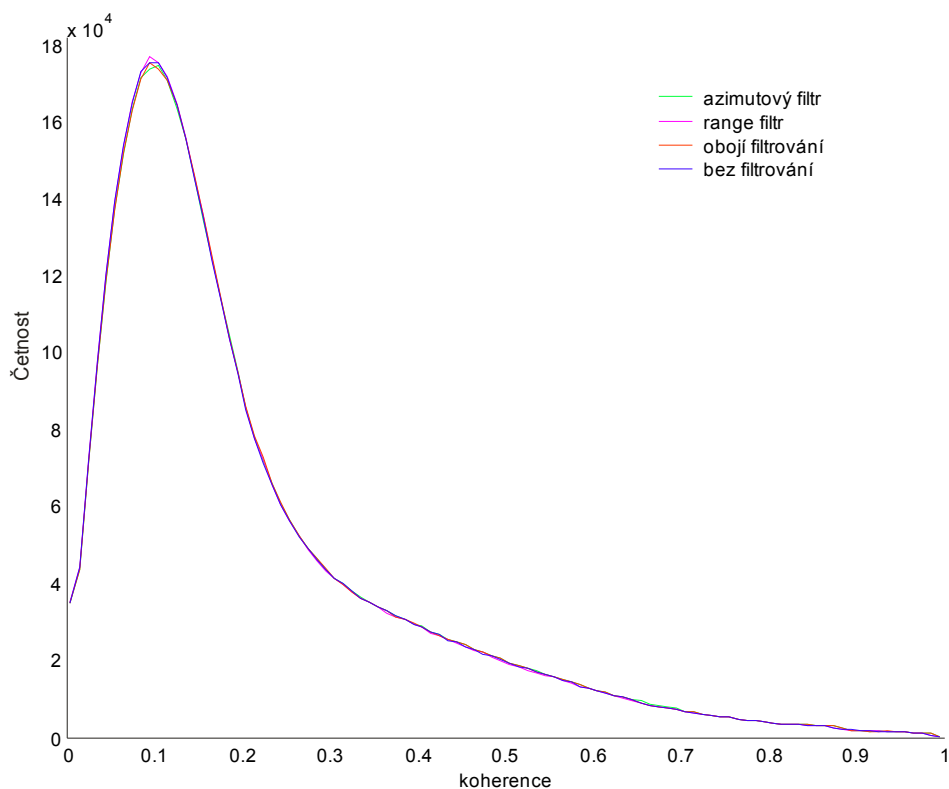
Obrázek 5.28: Interferogram s filtrováním ve směru range pro interferometrický pár 43468 - 26300.

### 5.3.6 Interferometrický pár 09767 - 12773 (oblast B)

	Snímek	Datum	Satelit	$f_{DC}$
hlavní	09767	3.3.1997	ERS-2	253,631 Hz
vedlejší	12773	29.9.1997	ERS-2	216,350 Hz

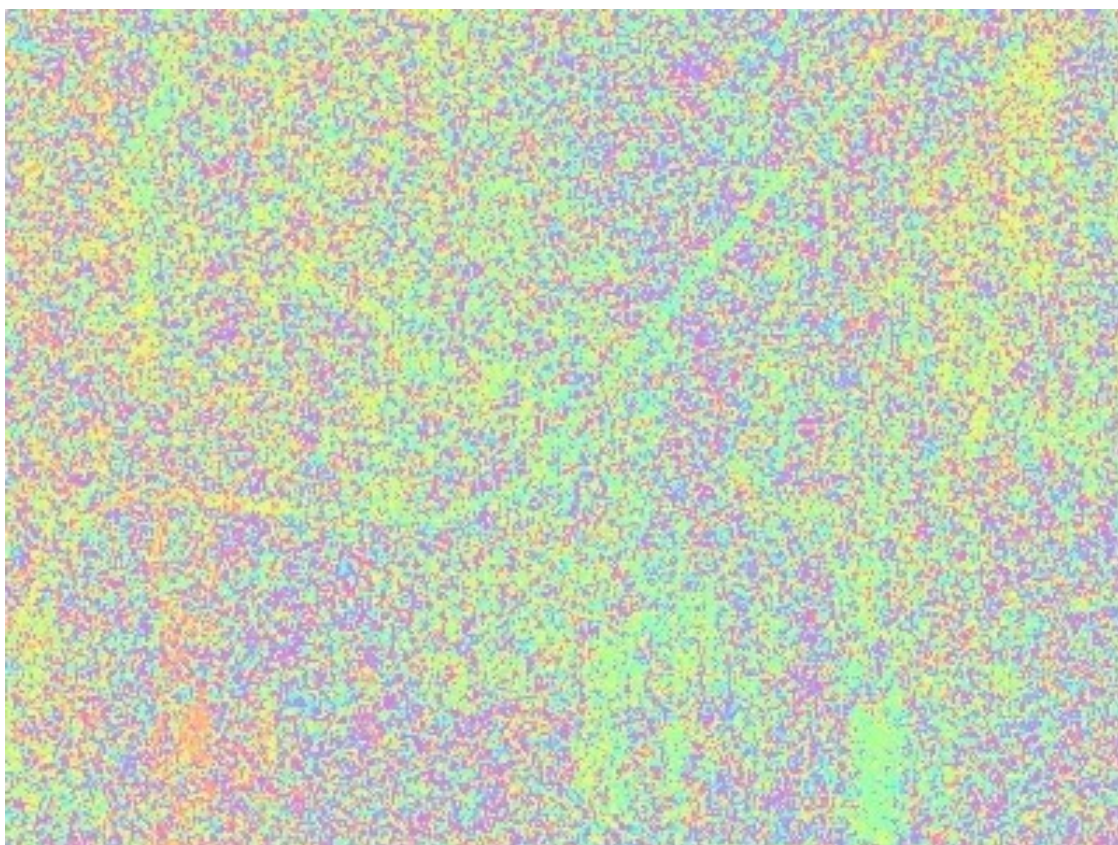
$B_{Temp}$	210 dní
$B$	26,2 m
$B_n$	25,9 m
$\theta_i$	22,8°
$q_A$	-360,7 m

Teoretický výpočet			
$\Delta f_r$	0,387 MHz	$\Delta f_{DC}$	37,81 Hz
$\gamma_{range}$	0,975	$\gamma_{azimut}$	0,972
$m_{range}$	2,55 %	$m_{azimut}$	2,82 %

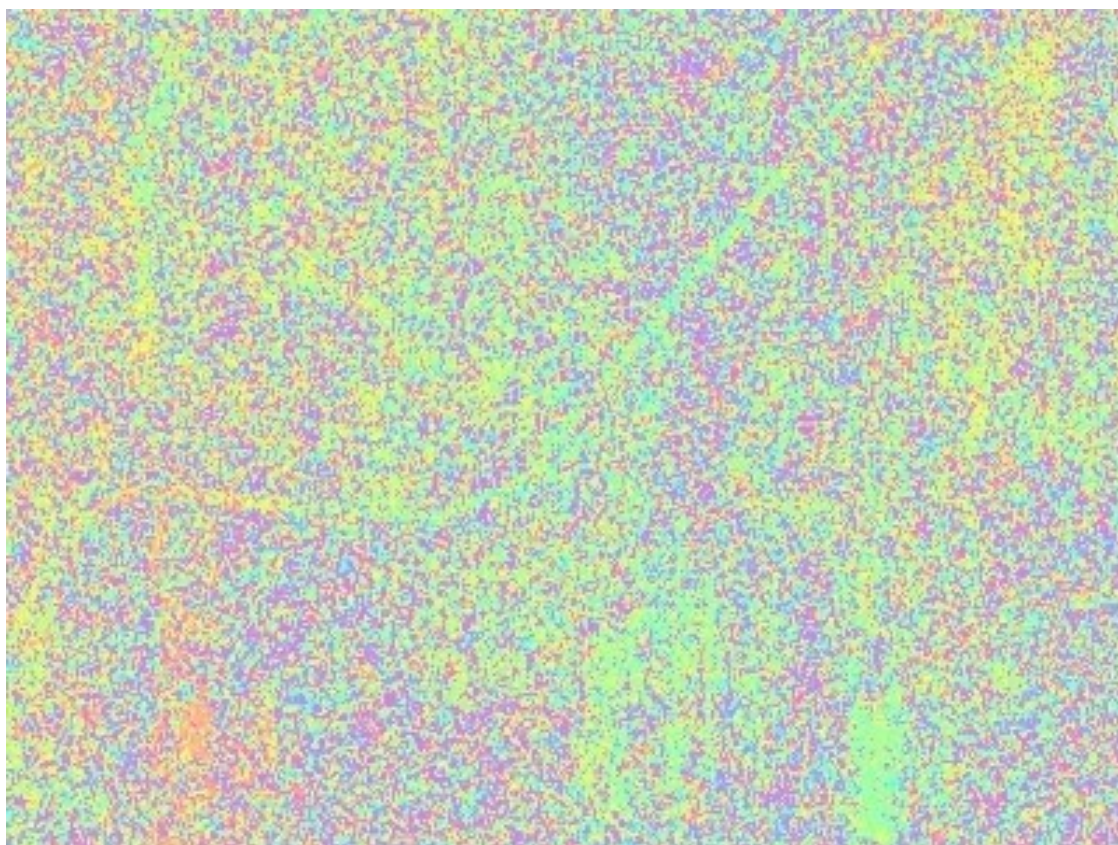


Obrázek 5.29: Histogram koherence pro interferometrický pár 09767 - 12773. Je zde znázorněn případ bez filtrování, s filtrováním, s filtrováním ve směru azimutu a s filtrováním ve směru range. Výřezy z jednotlivých interferogramů jsou uvedeny na obrázcích 5.30 - 5.33.



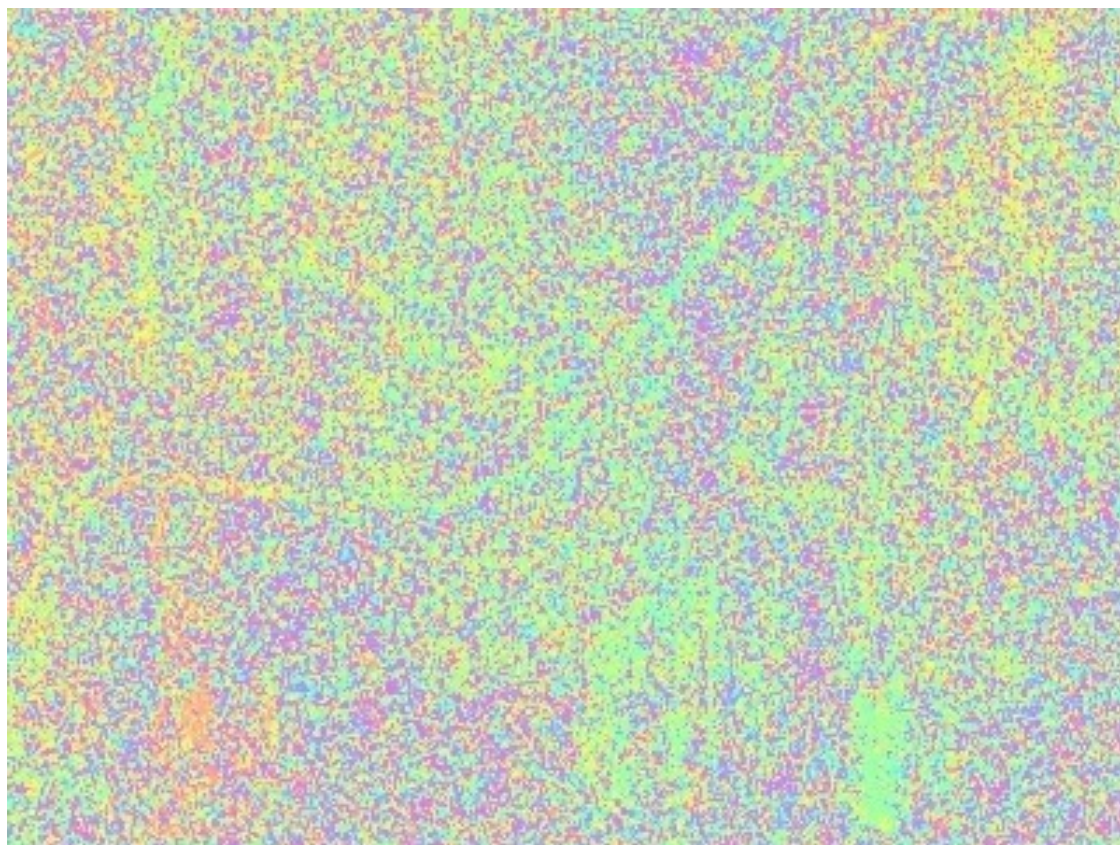


Obrázek 5.30: Interferogram bez filtrování pro interferometrický pár 09767 - 12773.

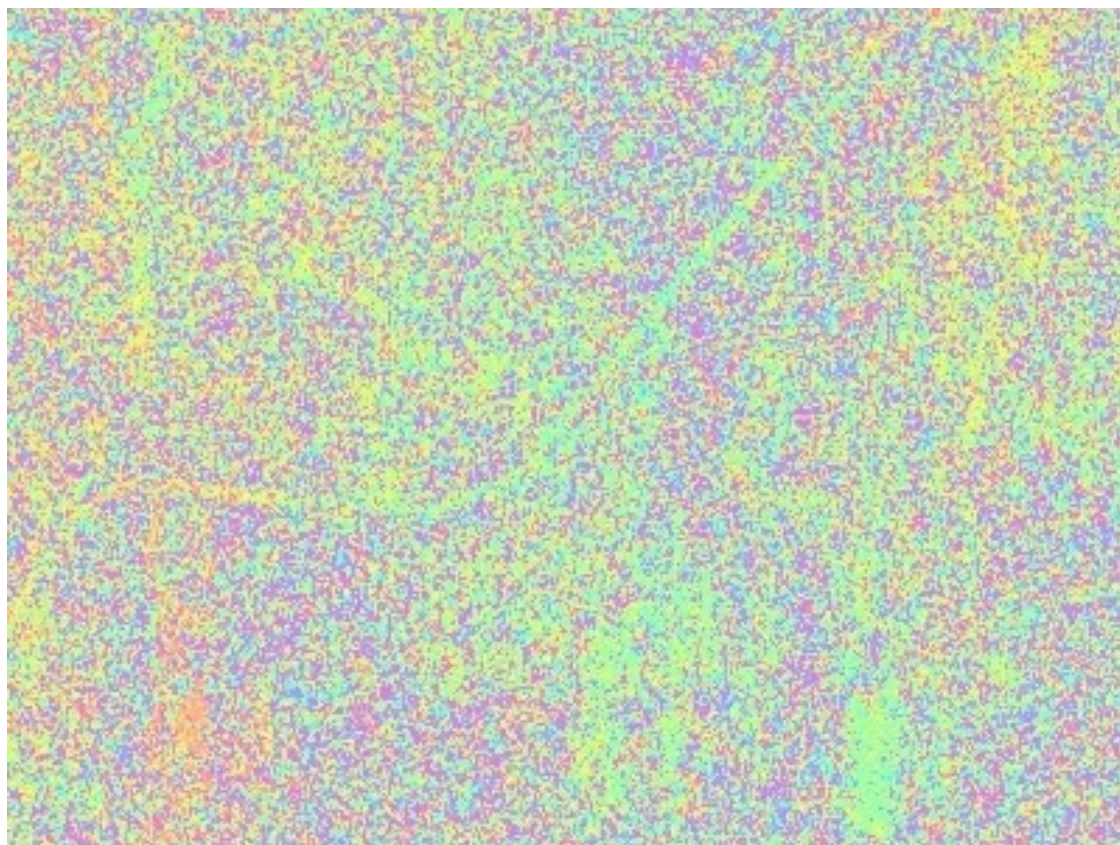


Obrázek 5.31: Interferogram s filtrováním v obou směrech pro interferometrický pár 09767 - 12773.





Obrázek 5.32: Interferogram s filtrováním ve směru azimutu pro interferometrický pár 09767 - 12773.



Obrázek 5.33: Interferogram s filtrováním ve směru range pro interferometrický pár 09767 - 12773.

## 5.4 Vyhodnocení zpracování interferometrických párů

Obecně se filtrování ve směru azimutu nepovažuje za tak nutné, jako v případě filtrování ve směru range.

Pokud však rozdíl frekvencí Dopplerových centroidů je vyšší než 100 Hz, odhad zlepšení interferogramu bude 7,8 % a rozdíl mezi filtrovaným a nefiltrovaným interferogramem už bude znatelný.

Při provedeném testování se rozdíly frekvencí Dopplerových centroidů u interferometrických párů z družice ERS-2 pohybovaly v rozmezí 0,773 Hz - 98,198 Hz. V případě interferometrického páru 09767 - 12773, s rozdílem frekvencí Dopplerových centroidů  $\Delta f_{DC} = 37,81$  Hz, začíná být vliv filtrování ve směru azimutu znatelné (zlepšení interferogramu je 2,82 %). U interferometrických párů s nižší hodnotou rozdílu Dopplerových centroidů byl vliv filtrování ve směru azimutu minimální.

Pokud se vezmou v úvahu kombinované páry ERS-1/2, tak rozdíly frekvencí Dopplerových centroidů se pohybují v rozmezí 171,987 Hz - 465,713 Hz (snímek 26300 je pořízený z družice ERS-2 s jedním gyroskopem). Pokud by se použili pouze snímky, pořízené před únorem 2000, rozdíly frekvencí Dopplerových centroidů by neměly přesáhnout 300 Hz [26]. V tomto případě je rozdíl mezi filtrovaným a nefiltrovaným interferogramem znatelný, což dokazuje například tandemový pár 43468 - 23795 s rozdílem frekvencí Dopplerových centroidů  $\Delta f_{DC} = 171,987$  Hz. Zvlášť výrazný vliv filtrace ve směru azimutu je u interferometrického páru 43468 - 26300, v němž snímek 26300 byl pořízen z družice ERS-2 s jedním gyroskopem. Zde má rozdíl frekvencí Dopplerových centroidů hodnotu  $\Delta f_{DC} = 465,714$  Hz a zlepšení interferogramu je 51 %.

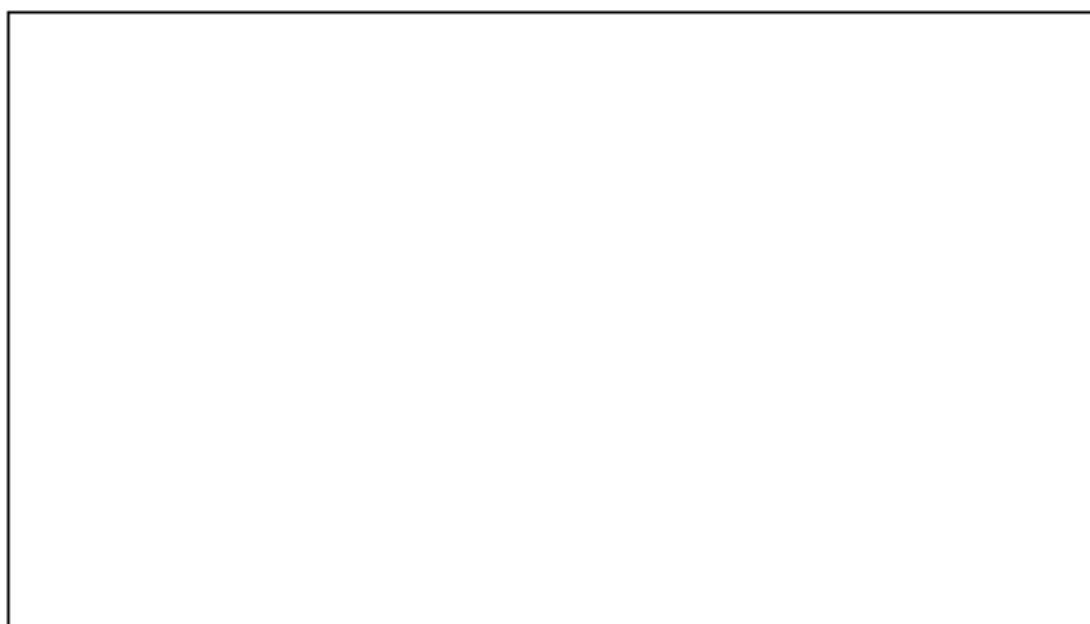
Pokud jsou tedy použity kombinované interferometrické páry ERS-1/2, použití filtrace ve směru azimutu je doporučeno a v případě použití snímků z družice ERS-2 s jedním gyroskopem je nutné pro zlepšení interferogramu.

V případě filtrování ve směru range je hlavním parametrem velikost kolmé základny mezi snímky. Při testování se velikosti kolmých základen interferometrických párů ERS-2 pohybovaly v rozmezí 10,3 m až 86,1 m. Vlivem malé velikosti kolmé základny je vliv filtrování ve směru range minimální. Lepších výsledků je dosaženo při použití filtrování ve směru range na kombinované interferometrické páry ERS-1/2. Zde se velikosti kolmých základen pohybují v rozmezí 163,4 m až 218,3 m, a dosažené zlepšení je 27,4 %. Nejlepší ukázkou filtrování ve směru range je v případě tandemového



páru 43468 - 23795, jelikož je zde pouze jednodenní časový interval pořízení snímků. Přestože testované interferometrické páry mají malé velikosti kolmých základen, lze říct, že filtrování ve směru range je užitečné a v případě kolmých základen přesahujících 300 m je nutné (u kolmé základny  $B_n = 600$  m je zlepšení interferogramu 132,82 %).

Uvedené interferogramy ukazují, že vlivem filtrování došlo ke zlepšení interferometrické fáze. Pro lepší znázornění šumu nebyl na interferogramy aplikován multilooking, tudíž pixely nejsou čtvercové. Výřezy mají rozměr 400 x 300 pixelů, díky čemuž jsou jednotlivé pixely rozeznatelné. Je zajímavé sledovat průběh koherence v závislosti na časové základně (obrázek 5.34, tabulka 5.2). Proto v následujícím grafu jsou vyneseny hodnoty průměrné koherence jednotlivých interferometrických párů v závislosti na čase.



Obrázek 5.34: Velikost průměrné koherence interferometrických párů v závislosti na čase.

<b>interferometrický pár</b>	<b>časová základna [dny]</b>
43468 - 23795	1
23294 - 43468	34
14777 - 15278	35
17282 - 14777	175
43468 - 26300	176
09767 - 12773	210

Tabulka 5.2: Přehled vybraných interferometrických párů s jejich časovými základnami.

## 6. Závěr

Radarová interferometrie je poměrně mladá disciplína, i když teoreticky byla představena v roce 1974. Teprve v roce 1991 však, díky vypuštění družice ERS-1, začaly vznikat výzkumné skupiny většinou v rámci studia na univerzitách. Zatímco v okolním světě byly prokázány možnosti a využitelnost této metody, u nás se teprve nyní začíná zkoumat její využitelnost pro naše území. Průkopníkem použitelnosti metody pro určování deformací vlivem poddolování na našem území je například laboratoř Dálkového průzkumu Země na Stavební fakultě, České vysoké učení technické v Praze.

V rámci jednotlivých diplomových a disertačních prací se provádí průzkum radarové interferometrie na vybraných snímcích našeho území. V mém případě bylo řešeno spektrální filtrování ve směru azimutu a range. Jedná se o krok ve zpracování, který ve výsledném interferogramu zredukuje šum, díky čemuž se zlepší koherence mezi snímky. Tento krok pak umožní lepší zpracování pro získání digitálního modelu terénu či deformačních map.

Z testování je patrné, že pokud rozdíl frekvencí Dopplerových centroidů je menší než 85 Hz, rozdíl mezi filtrovaným a nefiltrovaným interferogramem je téměř neznatelný. Pokud však použijeme snímky ze satelitu ERS-2 s jedním gyroskopem v kombinaci se snímky pořízenými před únorem 2000, zjistíme, že rozdíl frekvencí Dopplerových centroidů dosahuje celkem vysoké hodnoty. Po použití filtrování ve směru azimutu pak bylo dosaženo výrazného zlepšení mezi interferogramy. V případě filtrování ve směru range bylo taktéž dokázáno zlepšení. Bohužel vzhledem k malým velikostem kolmých základů není rozdíl mezi filtrovaným a nefiltrovaným interferogramem tak výrazný.

Na základě provedeného testování jsem prokázala, že filtrování spektra je zvlášť v některých případech nutné a pozitivní vliv na zvýšení koherence.

## Použité symboly

$\alpha$	lokální topografický sklon
$\Phi$	interferometrická fáze
$\Phi_{\text{ref}}$	fáze referenčního elipsoidu
$\gamma_c$	koeficient koherence
$\varphi$	fáze přijatého signálu
$\lambda$	vlnová délka vyslaného signálu
$\lambda_g$	projekce vlnová délka ze šikmého směru do roviny terénu
$\lambda_r$	vlnová délka v šikmém směru
$\theta$	úhel pohledu
$\theta_i$	úhel dopadu
$\theta_{\text{loc}}$	lokální úhel dopadu
$\sigma_h$	směrodatná odchylka výšek vypočteného digitálního modelu povrchu
$\sigma_\varphi$	směrodatná odchylka interferometrické fáze
$\Pi$	obdélníková okenní funkce
$\overline{\Pi}$	obdélníkové okno
$\psi$	úhlová odchylka vyzařování
$\Delta B$	části spektra, která nejsou společná pro oba snímky
$\Delta f_{\text{DC}}$	rozdíl frekvencí Dopplerova centroidu
$\Delta f_r$	spektrální posun range frekvence
$\Delta k_g$	posun ground range vlnového čísla
$\Delta r$	rozdíl vzdáleností k bodu z jednotlivých pozic radarů
$\Delta W$	části spektra, které nejsou společné pro oba snímky
$\Delta\theta$	rozdíl úhlů dopadu
$a$	faktor změny frekvence v čase
$A$	amplituda přijatého signálu
$B$	interferometrická základna
$B_h$	horizontální základna
$B_n$	kolmá základna
$B_{n,\text{crit}}$	kritická základna
$B_t$	tečná základna
$B_{\text{Temp}}$	časová základna
$B_v$	vertikální základna
$c$	rychlost světla ( $c = 299\,792\,458$ m/s)
$D$	vzdálenost radaru od bodu na povrchu
$f_{\text{DC}}$	frekvence Dopplerova centroidu
$f_{\text{DOP}}$	parametr dopplerovské šířky pásma popisující úhel paprsku antény
$f_{\text{fringe}}$	frekvence proužků
$f_g$	ground range frekvence

$f_h$	maximální frekvence spektra přijatého signálu
$f_o$	střední frekvence
$f_{PRF}$	opakovací frekvence PRF
$f_r$	range frekvence
$f_s$	vzorkovací frekvence
$f_{sr}$	vzorkovací frekvence spektra ve směru range
$H$	výška družice
$h(t)$	Fourierova transformace přenosové funkce $H(f)$
$H(f)$	přenosová funkce ve frekvenční oblasti
$H(f_a)$	přenosová funkce pro tvar spektra ve směru azimutu
$H(f_r)$	přenosová funkce pro tvar spektra ve směru range
$I$	komplexní interferogram
$k$	vlnové číslo
$k_g$	ground range vlnové číslo
$m$	zlepšení interferogramu
$n$	počet opakování celého rozsahu $2\pi$ vlnové délky
$P$	komplexní hodnota pixelu
$q_A$	výškový cyklus (míra neurčitosti)
$R$	průměrná vzdálenost družice a bodu uprostřed zobrazeného pásu
$r$	vzdálenost satelit - lokální místo
$T$	délka pulsu
$v$	rychlost radaru
$V_{\text{vonHann}}$	Hanningovo okno
$V_{\text{Hamm}}$	Hammingovo okno
$W$	šířka spektrálního pásma
$W_a$	šířka spektra ve směru azimutu
$W_r$	šířka spektra ve směru range (šířka pásma chirpu)
$x(t)$	přijatý časový signál
$x'(t)$	vyfiltrovaný časový signál
$X(f)$	přijatý signál ve frekvenční oblasti
$X'(f)$	vyfiltrovaný signál ve frekvenční oblasti

## **Anglicko - český slovník použitých termínů a zkratek**

Jelikož jsem se rozhodla napsat svou diplomovou práci v českém jazyce, byla jsem postavena před problém ohledně české odborné terminologie v případě radarové interferometrie. Proto zde uvádím anglicko - český slovník použitých termínů a jejich definice tak, jak je používám v diplomové práci.

### **AMI = Active Microwave Instrumentation**

Zařízení na družicích ERS, skládá se z radaru se syntetickou aperturou a rozptyloměru (scatterometer) pro určení charakteristik větru.

### **antenna footprint = stopa antény**

Území ozařované jedním vyslaným pulsem.

### **ASAR = Advance Synthetic Aperture Radar**

Radar se syntetickou aperturou, který je umístěn na satelitu ENVISAT.

### **ASF = Alaska SAR Facility**

### **ATSR = Along Track Scanning Radiometer**

Zařízení na družicích ERS, skládá se z infračerveného radiometru IRR a zařízení pro mikrovlnnou sondáž MWS.

### **azimuth = azimut**

Reprezentuje pozici senzoru podél trasy letu satelitu.

### **azimuth direction = směr azimutu**

Podélný směr, je souběžný se směrem letu satelitu.

### **azimuth filtering = filtrování ve směru azimutu**

Vlivem rozdílných frekvencí Dopplerova centroidu dochází k posunutí spekter ve směru azimutu. Při filtrování dochází k odstranění částí spekter, které nejsou společné pro oba snímky.

### **azimuth resolution = rozlišovací schopnost ve směru azimutu**

Rozlišovací schopnost ve směru azimutu. Díky aplikaci Dopplerova frekvenčního posunu dochází k řádovému zlepšení rozlišení.

### **backscatter = zpětný odražeč**

Bod na povrchu, který odráží zpět signál vyslaný z radaru.

### **bandwidth = šířka pásma**

Šířka kmitočtového pásma postačujícího při daném druhu vysílání pro zajištění přenosu informace.

### **carrier frequency = nosný kmitočet**

Základní kmitočet výstupu radaru, který je modulován signálem (výsledkem je vyslání lineárně frekvenčně modulovaného signálu).

**central frequency = střední frekvence**

**chirp**

Lineární frekvenční modulovaný puls.

**coarse coregistration = hrubá koregistrace**

První přibližný výpočet je na základě známých orbitálních parametrů (dráhy družice, absolutní polohy antény) s přesností několika desítek pixelů, druhý výpočet na základě amplitudy s přesností několika pixelů.

**coherence = koherence**

Koherence je míra spolehlivosti fáze v malém okolí pixelu.

**coherent radar = koherentní radar**

Kromě intenzity odraženého záření detekuje i fázi záření.

**complex conjugate multiplication = komplexně sdružené násobení**

Pomocí komplexního násobení pronásobíme první snímek druhým (buňka po buňce) a určíme tak fázové rozdíly pro výsledný interferogram.

**coregistration = koregistrace**

Pixel jednoho snímku musí přesně korespondovat s pixelem na druhém snímku. Výsledkem jsou páry odpovídajících si pixelů ve formě vektorů posunutí.

**corner reflector = koutový odražeč**

Trojstěnný terč, jehož stěny jsou vyrobeny z hliníku. Je umístěn na povrchu a orientovaný směrem k radaru, aby se zajistil dostatečně světlý pixel pro kalibraci intenzity snímku.

**cosine on a pedestal**

$\alpha + \beta \cdot \cos(2\pi f)$ , kde  $\alpha + \beta = 1$ .

**critical baseline = kritická základna**

Hranice, kdy snímek je kompletně dekorelován, a tudíž nevhodný pro interferometrické zpracování, jelikož interferogram bude plný šumu.

**data spectrum = datové spektrum**

Je dáno charakteristikou snímacího systému.

**decorrelation = dekorelace**

Vlivem snímací geometrie či časové dekorelace se zvyšuje šum v interferogramu a znemožňuje správně provést rozbalení fáze

**DFT = discrete Fourier transform**

Diskrétní Fourierova transformace, aplikována na vzorky signálu.

**D-InSAR = Differential Interferometric SAR**

Aplikace radarové interferometrie pro detekci deformací zemského povrchu.

**differential interferometric phase = diferenční interferometrická fáze**

Změna interferometrické fáze vlivem posunu povrchu ve směru vysílání paprsku.

**DMP = digitální model povrchu**

Výsledný výškový model je dán vrchním povrchem vegetace (prostupnost mikrovlnného záření vegetací je závislé na velikosti vlnové délky).

**Doppler centroid = Dopplerův centroid**

Dopplerův centroid paprsku je bod v azimutovém spektru ve vzdálenosti  $f_{DC}$  [Hz] od místa s nulovou frekvencí (vlivem zemské rotace a inklinace dráhy).  $f_{DC}$  se nazývá frekvence Dopplerova centroidu a nachází se uprostřed spektrálního pásma signálu

**DORIS = Delft Object Oriented Interferometric Software**

Program pro interferometrické zpracování snímků.

**ENVISAT = European earth observation satellite**

**ERS-1/2 = European Remote Sensing Satellite**

**ESA = European Space Agency**

**FFT = Fast Fourier Transformation**

Efektivní algoritmus pro výpočet diskretní Fourierovy transformace diskretního signálu. Používá se pro harmonickou nebo spektrální analýzu.

**fine coregistration = jemná koregistrace**

Výpočet korelace v malých výřezech z obrazů, která umožňuje provést výpočet se subpixelovou přesností.

**flat - Earth phase = referenční fáze**

Flat - Earth fáze je dána referenčním elipsoidem. Pokud by na snímaném území byla nulová topografie, interferogram by se skládal pouze z rovnoběžných proužků ve směru azimutu. Po odečtení referenční fáze je nejvýraznějším prvkem interferogramu topografie terénu.

**FM = frequency modulation**

Frekvenční (kmitočtová) modulace nosného kmitočtu.

**foreshortening = zhuštění**

Sklon svahů se blíží tvaru soustředné kružnice, a proto se strana směřující k senzoru jeví ve zkrácené délce a je světlejší.

**fringe frequency = frekvence proužků**

počet frekvenčních proužků na pixel

**geocoding = georeferencování**

Transformace ze systému interferogramu do geografického souřadného systému, tj. vypočte zeměpisnou šířku a délku a výšku každého pixelu.

**geometric decorrelation = geometrická dekorelace**

Vlivem geometrie snímání, tj. rozdílnost úhlů pohledu při pořízení snímků (velikost kolmé základny), rozdíly frekvencí Dopplerových centroidů snímků, vzniká šum, který zhoršuje korelaci snímků.

**Gibbs phenomenon = Gibbsův jev**

Odezva na impuls obsahuje překmity.

**GOME = Global Ozone Monitoring Experiment**

Zařízení na družici ERS-2.

**ground direction = příčný směr**

Směr kolmý ke směru letu satelitu.

**ground range**

Vzdálenost mezi prvním pixelem v řádce a daným pixelem naměřeným na zemském povrchu ve směru kolmém na směr letu.

**ground range frequency = ground range frekvence**

Frekvence objektového spektra. Při porovnání dvou ground range frekvencí je vidět posunutí spekter.

**ground track**

Projekce letové dráhy na zemský povrch.

**ground wavenumber = ground range vlnové číslo**

Projekce vlnového čísla do roviny terénu.

**Hamming window = Hammingova okenní (váhová) funkce**

Váhová funkce s parametry  $\alpha=0,54$  a  $\beta=0,46$ .

**height ambiguity (altitude of ambiguity) = výškový cyklus (míra neurčitosti)**

Relativní výškový rozdíl odpovídající vlnovému rozsahu  $2\pi$ , tj. jednomu interferenčnímu proužku.

**incidence angle = úhel dopadu**

Úhel mezi normálou Země a radarovým paprskem v místě dopadu paprsku na terén (tj. v místě ozáření povrchu).

**inclination = inklinace**

Úhel roviny orbity satelitu vůči rovině rovníku Země. Rovina orbity polární družice má inklinaci  $90^\circ$ , v případě družic ERS má inklinace hodnotu  $98,5^\circ$ .

**InSAR = Interferometric Synthetic Aperture Radar**

Způsob získání třírozměrné informace o zemském povrchu použitím fázové složky komplexního radarového signálu.

**interferometry = interferometrie**

Porovnání fází odpovídajících pixelů dvou SAR snímků daného území.

**interferometric baseline = interferometrická základna**

Vzdálenost mezi družicemi v rovině kolmé ke směru dráhy družice.

**interferometric fringe = interferometrický proužek**

Definován sousedními kontury stejné barvy, reprezentuje fázový rozdíl  $2\pi$ , neboli velikost vlnové délky vyslaného vlnění.

**interferometric phase = interferometrická fáze**

Fáze komplexního interferogramu, vypočtená komplexně sdruženým násobením dvou komplexních radarových signálů.



**IRR = InfraRed Radiometer**

Zařízení na družicích ERS, je to součást ATSR.

**JERS-1 = Japanese Earth - Resources Satellite**

**layover = překrytí**

Zkreslení terénu na snímku, vyskytuje se pokud sklon svahu je roven nebo dokonce převyšuje úhel pohledu  $\theta$ . Zobrazení pak obsahuje signál ze dvou míst, která mají stejnou vzdálenost od radaru, ale leží v určité vzdálenosti od sebe.

**look angle = úhel pohledu**

Úhel mezi normálou Země a radarovým paprskem na družici.

**master image = hlavní snímek**

Snímek, ke kterému je vztaženo interferometrické zpracování.

**mainlobe = hlavní lalok**

Maximum funkce sinus cardinalis, šířka spektra hlavního laloku má vliv na rozlišení.

**multilook**

Určitý počet  $N$  pixelů o stejném azimutu, který se zprůměruje do jednoho pixelu o větší velikosti. Po této úpravě jsou rozměry v range a azimutu přibližně stejné. Nejčastěji se používá multilook v poměru 1/5 (jeden pixel ve směru range ku 5 pixelů ve směru azimutu).

**MWS = MicroWave Sounder**

Součást zařízení ATSR na družicích ERS, slouží pro mikrovlnnou sondáž.

**NASA = National Aeronautics and Space Administration (of the United States)**

**NASDA = National Aeronautics and Space Development Agency (of Japan)**

**noise . free interferogram = nezašumělý interferogram**

Odstraněním částí spekter, které nejsou společné pro oba snímky, se odstraní šum z interferogramu.

**object spektrum = objektové spektrum**

Vlivem snímací geometrie se liší úhly pohledu a tudíž úhly dopadu na stejném místě jsou mírně odlišné. Zaznamenaný zpětný odraz senzorem, který pořizuje vedlejší snímek, bude obsahovat odlišnější část objektového spektra, než zaznamenaný zpětný odraz senzorem, pořizující hlavní snímek.

**offset = posun**

Posun vedlejšího snímku vůči hlavnímu.

**parallel baseline = tečná základna**

Projekce interferometrické základny do roviny rovnoběžné se směrem paprsku.

**perpendicular baseline = kolmá základna**

Projekce interferometrické základny do roviny kolmé ke směru vysílání záření.

**phase filtering = fázové filtrování**

Provede redukci šumu v interferogramu pomocí lokálních filtrů.

**phase unwrapping = rozbalení fáze**

Určitému počtu interferometrických proužků se přiřadí fáze, odpovídající výškovému rozdílu.

**plane perpendicular to the orbit = Rovina kolmá na dráhu družice.**

**polarization = polarizace**

Orientace elektromagnetického vektoru vyslaného radarového signálu. Zobrazovací radar může vlnu vyzařovat jak horizontálně (H), tak vertikálně (V) polarizovanou a přijímá opět buď horizontální signál, vertikální signál nebo obojí.

**PRARE = Precision Range And Range-rate Equipment**

Přesný systém pro měření dráhy družice, součást zařízení na družici ERS-2. Pracuje na principu Dopplerových frekvenčních posunů (změny frekvence způsobené radiálním pohybem vzhledem k přijímači).

**PRF = Pulse Repetition Frequency.**

Frekvence vyslaných pulsů, tj. udává interval, jak rychle jsou pulsy vysílány za sebou.

**RA = Radar Altimeter**

Zařízení na družicích ERS, slouží k určení přesné vzdálenosti "družice - povrch" pro odvození tvaru geoidu, případně typu a tloušťky ledu.

**RADAR = RADio Detection And Ranging**

Rádiové odhalování a určování vzdáleností. RADAR vysílá vlnové záření a přijímá jeho odraz od povrchu se současným měřením časového intervalu. Pomocí těchto údajů zjišťuje předměty na povrchu a měří jejich vzdálenosti a případně polohy.

**radar interferometry = radarová interferometrie**

Metoda snímání a zpracování radarových snímků na základě rozdílů ve fázi dvou radarových komplexních signálů získaných z odlišné pozice radaru.

**range = vzdálenost**

Rozdíl mezi vzdálenostmi radar-první pixel a radar-daný pixel na zemském povrchu.

**range direction = směr kolmý na směr letu**

Směr pro měření vzdálenosti.

**range filtering = filtrování ve směru range**

Odstraní nepřekrývající se části spektra ve směru range (vlivem rozdílných úhlů pohledu radarů).

**range frequency = range frekvence**

Frekvence vyskytující se ve spektru ve směru range.

**range resolution = rozlišovací schopnost ve vzdálenosti**

Rozlišovací schopnost ve směru kolmém na směr letu; čím dále od osy letu, tím je lepší, tj. schopnost radaru odlišit dva odražeče v nepatrně odlišných vzdálenostech.

**rectangular window = obdélníková okenní funkce**

Váhová funkce vzorkující přijatý signál.

**repeat-pass interferometry = víceobletová interferometrie**

Radarová interferometrie pomocí více snímků z jednotlivých přeletů nad zájmovým územím.

**resampling = převzorkování**

Převzorkování vedlejšího snímku na hlavní snímek.

**resolution cell = rozlišovací buňka**

Definovaná v SAR obrazu. Obsahuje informaci o amplitudě a fázi přijatého záření.

**sampling frequency = vzorkovací frekvence**

Velikost vzorkovací frekvence je dána konstrukcí radaru.

**SAR = Synthetic Aperture Radar**

Radar se syntetickou aperturou nahrazuje délku antény způsobem měření a zpracování a docílí tak efektu velmi dlouhé antény.

**SAR Image = zobrazení radaru se syntetickou aperturou**

Každý pixel SAR obrazu obsahuje informaci o intenzitě (amplituda) a fázi přijatého záření. Intenzita pixelu je vázána k odrazovým vlastnostem povrchu a fáze ke vzdálenosti.

**SAR processing (focusing) = SAR zpracování**

**SAR raw data**

Soubor koherentně detekovaných odrazových signálů.

**shadow = stín**

Území na snímku, která jsou v zákrytu vysokých terénních bloků a tudíž je zde nulový zpětný odraz.

**sidelobes = vedlejší laloky**

Postraní záhyby funkce sinus cardinalis. Jejich existence zhoršuje rozlišení.

**side - looking radar = boční radar**

Anténa je na boku nosiče a snímá v šikmém směru.

**single - pass interferometry = jednoobletová interferometrie**

Současné pořízení snímků použitím vysílací/přijímací antény a druhé přijímací antény, které jsou od sebe v určité vzdálenosti.

**slant range = šikmá vzdálenost**

Vzdálenost od bodu na zemském povrchu k senzoru v šikmém směru.

**slave image = vedlejší snímek**

Při interferometrickém zpracování je přidružený k hlavnímu snímku.

**SLC = Single Look Complex**

"Ostrý" obraz, který prošel předzpracováním (např. zaostření na Dopplerův centroid).

**SNR = Signal-to-noise ratio**

Poměr signál / šum

**speckle = efekt pepř a sůl**

Pokud je velká homogenní oblast povrchu, bude se zde vyskytovat velké množství pixelů s různě velkými amplitudami (různá místa mají rozdílnou vlhkost, sklon listů apod.). Výsledná hodnota je dána součtem signálů z dílčích ploch buňky.

**spectral filtering = filtrace spektra**

Pro zlepšení korelace snímků je potřeba odstranit šum způsobený geometrickou dekorelací. Při filtrování se odstraňují části spektra, která se nenachází současně v obou snímcích.

**squint angle = úhlová odchylka vyzařování**

Úhel mezi osou radarového paprsku (frekvence Dopplerova centroidu) a normálou k dráze letu (nulový Dopplerův frekvenční posun). Vzniká vlivem rotace Země, inklinace dráhy a chyby v natočení radaru.

**SRTM = Shuttle Radar Topography Mission.**

**swath = šířka záběru**

Pás na povrchu, který je ozářen během pohybu radarového paprsku.

**temporal baseline = časová základna**

Časový okamžik mezi dvěma expozicemi. Pokud jsou na dvou snímcích velké rozdíly vlivem většího časového intervalu mezi nimi, snižuje se korelace. Čím nižší je korelace, tím více si snímky neodpovídají.

**terrain slope = sklon terénu**

Úhel mezi horizontální rovinou a tečnou terénu daném bodě.

**three - pass interferometry = tříobletová interferometrie**

Tři snímky stejného území, přičemž jeden snímek je uvažován jako hlavní, zbývající snímky jsou k němu připojeny. Vytvoří se dva interferogramy se společným hlavním snímkem. Jejich odečtením vyloučíme topografii a získáme deformační mapu území.

**transfer function = přenosová funkce**

Charakterizuje tvar spektra.

**two - pass interferometry = dvouobletová interferometrie**

Pomocí dvou snímků zájmového území vytvoříme interferogram, odečtením topografie vytvořené na základě externího digitálního modelu povrchu lze získat deformační mapu.

**Von Hann window = Hanningovo okno**

Váhová funkce s parametry  $\alpha = 0,5$  a  $\beta = 0,5$ .

**wavenumber = vlnové číslo**

Definované jako podíl  $2\pi / \lambda$ .

**wavenumber shift = posun vlnového čísla**

Metoda používající vlnové číslo k odvození posunu v objektovém spektru.

## Použitá literatura

- [1] Neumann, M. - Reigber, A. - Guillaso, S. - Jäger, M. - Hellwich, O.: *PollInSAR Data Processing With Rat (Radar Tools)*. Berlín, Germany, 2005.
- [2] Pavelka, K.: *Zpracování obrazových záznamů DPZ*. skriptum ČVUT, Praha, 1999.
- [3] Pavelka, K.: *Dálkový průzkum Země 10: Operační systémy*. skriptum ČVUT, Praha, 1998.
- [4] Graham, R.: *Synthetic interferometer radar for topographic mapping*. Proc. IEEE, vol. 62, pp. 763-768, 1974.
- [5] Kolář, J.: *Fyzikální základy dálkového průzkumu*. skriptum ČVUT, Praha, 1990.
- [6] Centre for the Observation and Modelling of Earthquakes and Tectonics. <http://comet.nerc.ac.uk/schoolssar1.html>.
- [7] USGS InSAR Research Group. <http://volcanoes.usgs.gov/insar/index.html>.
- [8] Urban, P.: *Radarová interferometrie*. Geodetický a Kartografický Obzor, č. 12, str. 227–231, 2002.
- [9] Čapková, I.: *Satellite orbit errors and their influence on interferograms*. Diplomová práce. ČVUT, Praha, 2005.
- [10] Bürgmann, R. - Rosen, P. A. - Fielding, E. J.: *Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and its Deformation*. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, str. 169-209, 2000.
- [11] Bezoušek, P. - Šedivý, P.: *Radarová technika*. skriptum ČVUT, Praha, 2004.
- [12] Bamler, R. - Schättler, B.: *SAR Data Acquisition and Image Formation*. SAR Geocoding - Data and Systems, str. 53-99.
- [13] Urban, P.: *Detekce polohových změn zemského povrchu radarovou interferometrií*. Disertační práce. ČVUT, Praha 2005.
- [14] ESA - ERS: [http://www.esa.int/esaEO/SEMGWH2VQUD\\_index\\_0\\_m.html](http://www.esa.int/esaEO/SEMGWH2VQUD_index_0_m.html).
- [15] ESA - informace o družicích: <http://orbits.esa.int/orbits/eo/satellite/satellite.htm>.
- [16] Canadian Space Agency: <http://www.space.gc.ca/asc/eng/satellites/radarsat1/default.asp>
- [17] National Space Development Agency of Japan: [http://www.nasda.go.jp/projects/sat/jers1/index\\_e.html](http://www.nasda.go.jp/projects/sat/jers1/index_e.html)
- [18] Geoscience Australia: [http://www.ga.gov.au/acres/prod\\_ser/sensor.htm](http://www.ga.gov.au/acres/prod_ser/sensor.htm)

- [19] Kampes, B. M. - Hanssen, R. F - Perski, Z.: *Radar interferometry with public domain tools*. FRINGE 2003, Frascati, Italy, 2003.
- [20] DORIS: <http://enterprise.lr.tudelft.nl/doris/usermanual/dorismanual.html>
- [21] Canada Centre for Remote Sensing:  
[http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tutorials/fundam/fundam\\_e.html](http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tutorials/fundam/fundam_e.html)
- [22] Bamler, R.: *Digital Terrain Models from Radar Interferometry*. Photogrammetric Week '97, str. 93-105.
- [23] Hanssen, R. F.: *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2001.
- [24] Reigber, A.: *Range Dependent Spectral Filtering to Minimize the Baseline Decorrelation in Airborne SAR Interferometry*. IGARSS '99, Hamburg, Germany, str. 1721-1723, 1999.
- [25] Bamler, R. - Hartl, P.: *Synthetic aperture radar interferometry*. Electronic journals, Inverse Problems, 1998.
- [26] Swart, L. M. Th.: *Spectral filtering and oversampling for radar interferometry*. Nederland, 2000.
- [27] Curlander, J. C. - McDonough, R. N.: *Synthetic aperture radar: systems and signal processing*. John Wiley & Sons Inc., New York, 1991.
- [28] Olmskd, C.: *Alaska SAR Facility: Scientific SAR User's Guide*. Senior Programmer/Analyst, 1993.
- [29] Solaas, G. - Laur, H.: *An Assessment of ERS SAR Low Resolution Imagery*. ESA Fellowship at ESRIN, 1993.
- [30] Askne, J. - Dammert, P. - Smith, G.: *Report on ERS-1/2 tandem demonstration, ESA internet dokument*, 1996.  
<http://earth.esa.int/rootcollection/eo4.10075/00396.html>
- [31] Gatelli, F. - Guarnieri, A. M. - Parizzi, F. - Pasquali, P. - Prati, C. - Rocca, F.: *The Wavenumber Shift in SAR Interferometry*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 32. no. 4, 1994.
- [32] Rodriguez, E. - Martin, J. M.: *Theory and design of interferometric synthetic aperture radars*. IEE Proceedings - F, vol. 139, no. 2, 1992.
- [33] Fornaro, G. - Guarnieri, A. M. - Rocca, F.: *Optima, space-varying spectral filtering of IFSAR data*.
- [34] Guillaso, S. - Reigber, A. - Ferro-Famil, L. - Portiér, E.: *Range Resolution Improvement of Airborne SAR Images*. IEE Geoscience and Remote Sensing letters, vol. 3, no.1, 2006.

- [35] Sandwell, D. T.: *SAR Image Formation: ERS SAR Procesor coded in MATLAB*. 2002.
- [36] Zebker, H. A.: *Interferometric SAR processing tutorial: an overview of the extensions to SAR processing required for interferometric radar data reduction*. <http://www.stanford.edu/~zebker/tutvg.rtf>
- [37] Jet Propulsion Laboratory: <http://www.jpl.nasa.gov>.
- [38] Huadong, G. - Hao, L. - Changlin, W. - Huanying, Y.: *The coseismic deformation field of  $m = 7.5$  Mani earthquake in Tibet mapped by ERS interferometric SAR data*