

# Radarová interferometrie: mapování deformací v severních Čechách

Ivana Čapková, Stavební fakulta ČVUT  
Katedra mapování a kartografie  
ivana.capkova@fsv.cvut.cz

## Abstrakt

Radarovou interferometrii lze kromě vytváření digitálního modelu terénu (DEM) použít též k mapování deformací terénu — sesuvů, vytěžených oblastí a podobně. Ke zpracování byly v našem případě použity tři družicové (radarové) snímky severních Čech (především hnědouhelná pánev) z let 1998–1999 a SRTM DEM z roku 2000. K vyhodnocení výsledků jsme použili open-source software DORIS, ve kterém jsme vyzkoušeli jak ”two-pass”, tak i ”three-pass” metodu.

## Abstrakt

Besides generating digital elevation models, radar interferometry may be used for terrain deformations mapping: landslides, mined areas etc. In our case, we used three satellite (radar) images of Northern Bohemia (mostly the brown-coal basin) acquired during 1998–1999 and SRTM DEM, acquired in 2000. Interferometric processing was performed in the DORIS open-source software. We tested both two-pass and three-pass methods: the differences are discussed here.

## 1 Úvod

Radarová interferometrie je metoda v zahraničí již hojně používaná, avšak v české kotlině dosud nerozšířená. Používá se jak k vytvoření digitálního modelu terénu, tak k mapování deformací či k zjištování vlastností atmosféry.

Radar, umístěný na družici, měří vzdálenost a odrazivost povrchu Země. Na rozdíl od jiných aplikací, kde se zpracovává především amplituda (odrazivost) snímku, je v interferometrii důležitá fáze tohoto signálu, odpovídající ”vzdálenosti” vysílače od odražeče. Nejde však o typickou vzdálenost, je to jen doměrek vůči celistvému násobku  $\frac{\lambda}{2}$ , kde  $\lambda$  je vlnová délka signálu.

Metoda interferometrie je založena na zpracování dvou snímků stejného území. Budeme se zde zabývat pouze metodou (multi-pass), kde byly snímky sejmuty stejnou družicí (nebo jinou družicí na stejně oběžné dráze) v jinou dobu. Z rozdílu fází jednoho bodu v obou snímcích pak lze zjistit výšku tohoto bodu nad hladinovým elipsoidem (podobně jako u stereo-efektu, nicméně radar měří vzdálenost).

Přesnost zjištěné výšky bodu závisí na výšce družic (která je téměř konstantní) a vzdálenosti mezi nimi, tj. základně.

Po SAR zpracování, které převádí signál změřený radarem na obraz, má snímek rozlišení cca 4.5 m ve směru letu a 20–30 m ve směru kolmém.

Používáme snímky z družic ERS-1/2, které nám poskytla ESA. V březnu 1999 tyto družice snímkovaly v tzv. ”tandem režimu”, kdy ERS-2 následovala ERS-1 na stejné orbitě s přibližně 24hodinovým zpožděním. Nyní je v provozu pouze ERS-2 a ENVISAT, který však létá na jiné oběžné dráze a má jinou frekvenci, a kombinace snímků z různých typů družic byla velmi složitá.

Družici ERS-2 vidíme z daného místa na Zemi zhruba jednou za 3 dny, ale teprve za 35 dní se objeví na stejném místě; kombinace snímků z jiných orbit vyžaduje také náročnější zpracování.

Rozhodli jsme se otestovat možnosti metody v severních Čechách: používáme pět snímků, a to ze 7. a 8. března 1999 (časová základna je pouze cca 24 hodin, deformace se tedy pravděpodobně nepřihodily) a 28. prosince 1998. Tyto tři snímky tvoří trojici pro ”three-pass” metodu. Dále bychom rádi využili snímků z 13. listopadu 2002 a 26. února 2003,

zobrazující mírně odlišnou oblast, tyto se nám však nedáří zkoregistrovat a nelze je tedy nadále použít.

Při výběru snímků byla použita přísná meteorologická kritéria: tři dny před sejmutím ani tři dny po něm nesmělo pršet ani sněžit. Taktéž bylo vyloučeno letní období, kdy by mohly snímky být "zkaženy" vegetací.

## 2 Interferometrické zpracování, DORIS

Interferometrické zpracování lze provádět v open-source systému DORIS [1], vyvinutém na TU Delft. Tento systém funguje pod operačním systémem Linux (lze jej provozovat i pod CygWin), proces interferometrického zpracování rozděluje do mnoha kroků a používá textové soubory s parametry, takže není problém vybrat metodu zpracování určitého kroku či daný krok zopakovat.

Prvním důležitým krokem po načtení dat a údajů o orbitách družic je koregristrace. Oba snímky je nutno přiložit přesně na sebe (s přesností kolem desetiny pixelu) a jeden z nich (slave snímek) pak převzorkovat na ten druhý (master), aby si přesně odpovídaly. Používá se polynomální transformace.

Parametry tohoto polynomu se zjišťují výpočtem korelace mezi malými částmi scény (desítky až stovky pixelů). Zde se používá pouze amplituda snímku, nikoli jeho fáze.

Když sedí oba snímky přesně na sobě, lze jejich fázi jednoduše pixel po pixelu odečíst (vzhledem k tomu, že je fáze omezena na interval  $(-\pi, \pi)$ , odečtení se provádí komplexně sdruženým součinem). Tím dostaneme interferogram, od kterého odečteme fázi elipsoidu nahrazujícího Zemi, která má rušivý efekt a nepřináší žádnou informaci. Interferogram následně vyfiltrujeme a spočítáme koherenci, udávající "spolehlivost" fáze v daném bodě. Tato je dána jako

$$\gamma = \left| \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N M_i S_i^*}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N M_i M_i^* \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N S_i S_i^*}} \right|,$$

kde  $M_i$  a  $S_i$  jsou fáze master, resp. slave snímků, a  $N$  je počet pixelů v okně, ve kterém se koherence počítá. Koherenční obraz závisí na velikosti okna, ve kterém výpočet probíhá: je-li toto okno malé, jsou vidět i malé oblasti se stabilní fází, na druhou stranu se ale ztrácí statistický význam koherence.

Příklad interferogramu je vidět např. na obrázku 1, příklad koherenčního obrazu např. na obrázku 2.

Tento interferogram nyní obsahuje topografickou složku (odpovídající terénu), deformační složku (deformace, které se staly mezi sejmutím obou snímků), vliv atmosféry a artefakty způsobené nepřesnými orbitami družic (nepřesně odečtená fáze elipsoidu).

Pokud chceme z interferogramu vygenerovat DEM, stačí interferogram pouze rozbalit a geokódovat, např. podle informací o poloze družic. Tato poloha je většinou nepřesná a chyby v DEM jsou podstatné, proto je lépe při geokódování využít identických bodů. DEM negeokódovaný či geokódovaný pouze s využitím informací o poloze družic lze víceméně využít pouze pro odečtení topografické složky z jiného interferogramu.

V interferogramu je důležitá hodnota tzv. "altitude of ambiguity", určující, jaký rozdíl výšky odpovídá jednomu interferometrickému proužku. Tato hodnota přímo závisí na kolmé složce základny (míněno kolmo ke směru paprsku): čím je kolmá základna delší, tím je menší "altitude of ambiguity" a lze generovat DEM s vyšší přesností. Na druhou stranu pokud chceme interferometrii využít pro mapování deformačí, budeme chtít co nejvyšší "altitude of ambiguity", aby se v deformačním interferogramu co nejméně projevily chyby DEM.

Pokud provádíme mapování deformačí, potřebujeme z interferogramu nejprve odečíst topografickou složku. Tu získáme buď z jiného interferogramu (ve kterém není deformační složka nebo je vůči té, kterou očekáváme v tomto interferogramu, zanedbatelná), nebo z externího DEM. Interferogram, který použijeme pro odečtení fáze odpovídající topografii, je nutno nejprve rozbalit; při použití externího DEM je tento nutno nejprve převést do systému radaru. Potom se fáze tohoto DEM odečte od fáze interferogramu, který obsahuje kromě topografické složky i složku deformační (opět se používá komplexně sdružené násobení).

Jako externí DEM používáme SRTM DEM [3], který je na webu volně ke stažení (rozlišení 3 úhlové vteřiny). Tento DEM byl pořízen interferometrickou metodou v roce 2000 z raketoplánu, který měl radarový vysílač a dva přijímače, obojí navíc jak v X,

tak i v C pásmu. Souběžný příjem signálu v obou přijímačích má několik výhod: nevstupuje sem vliv atmosféry (zpoždění signálu je stejné v obou přijímačích) a vzhledem k současnému příjmu nejsou zalesněné oblasti dekorelované (dekorelované jsou pouze vodní plochy). Nezávislé zpracování z obou frekvencí též umožňuje verifikaci rozbalení fáze. Vlivem neměnné základny jsou též vyloučeny chyby orbit a s nimi spojené artefakty v interferogramu.

Interferogram s odečtenou topografickou složkou by pak měl být jednobarevný; deformovaná místa se v něm pak objeví jako místa zbarvená jinak. Tento interferogram však obsahuje i vliv atmosféry, který by v našem případě (byly vyloučeny srážky) měl mít dlouhovlnný efekt.

Kritickým krokem celého zpracování je tzv. rozbalení fáze. To je v principu nejednoznačná úloha, spočívající v převodu fáze z intervalu  $(-\pi, \pi)$  do reálných čísel, odpovídajících např. výše. Fáze  $\varphi \in (-\pi, \pi)$  se převede na hodnotu  $\varphi_{roz} = \varphi + 2k\pi$ , kde číslo  $k$  znázorňuje právě onu mnohoznačnost. Tuto úlohu lze snadno vyřešit pomocí "selského rozumu" v případě, že se nevyskytují rozdíly ve fázi větší než  $\pi$  a že interferogram není zašuměný. Tyto předpoklady jsou v praxi většinou porušeny.

Na vyřešení této úlohy existuje několik různě úspěšných algoritmů, podrobnosti lze nalézt v [2]. Pro informaci o lokálním "zašumění" interferogramu (tj. o spolehlivosti fáze v dané oblasti) se většinou používá koherenční obraz, tedy tam, kde je koherence vysoká, se fáze rozbalí pravděpodobně dobře, ale v místech, která jsou zašuměna, mohou vzniknout velké chyby. Problémem jsou zašuměné oblasti rozdělující jinak nezašuměný interferogram na několik částí (např. řeky): v tomto případě nelze nijak zjistit, jaký je mezi těmito oblastmi výškový rozdíl.

DORIS rozbalení fáze neimplementuje, má však vazbu na jiný open-source program, SNAPHU, který rozbalení fáze provádí statistickou metodou; v našich podmínkách se tento program osvědčil, i když ne ve všech případech.

Jak již bylo řečeno, topografickou složku lze z interferogramu odečítat dvěma způsoby. K vyhodnocení deformací můžeme buď použít trojici snímků (dva interferometrické páry, mající společný master snímek — tzv. "three-pass" metoda), nebo použít jen dva snímky a DEM — tzv. "two-pass" metoda. Obě metody mají své výhody a nevýhody.

Výhodou three-pass metody je "automatická koregistrace" obou interferogramů a vysoké rozlišení topografického interferogramu. Vzhledem k tomu, že oba interferogramy mají společný master snímek, je samozřejmé, že oba interferogramy nejsou oproti sobě posunuty ani o zlomek pixelu. Taktéž mají oba interferogramy stejně rozlišení. Nevýhodou této metody je to, že v topografickém interferogramu se mohou objevit chyby, například vliv atmosféry, chyby v orbitech družic a podobně, které se potom přenesou do deformačního interferogramu jako artefakty. Další nevýhodou "three-pass" metody je to, že její aplikace nutně vyžaduje aplikovat na topografický interferogram rozbalení fáze, které není vždy spolehlivé a v některých případech může být i nemožné.

Výhodou two-pass metody je bezchybnost (alespoň relativní) externího DEM. SRTM DEM má relativní přesnost cca 5 m, což je při naší "altitude of ambiguity" zanedbatelná hodnota. Podstatnou nevýhodou je koregistrace (posuny interferogramu oproti DEM zkonzertovanému do systému radaru jsou ve stovkách pixelů ve směru letu a v desítkách pixelů ve směru kolmém) — odečítání topografické složky lze v DORISu provádět pouze přibližně. Navíc SRTM DEM má rozlišení 3 úhlové vteřiny, což činí necelých 100 m. Toto je nutné převzorkovat a při nevhodné nakloněných svazích je nutné DEM převedený do radarového systému navíc interpolovat, aby v něm nebyla "bílá místa". Další výhodou SRTM DEM je v našem případě i to, že byl pořízen o rok později než snímky zpracovávané v projektu (únor 2000), tudíž v místech, kde není na interferogramu s časovou základnou 2 měsíce vidět deformace, na interferogramu s odečtenou fází ze SRTM už deformace vidět jsou.

Nejde však o deformace v interferometrickém smyslu slova, jde o "chybu DEM". Klasické deformace vzniklé mezi dvěma snímky se v interferogramu projeví změnou fáze vůči okolí o hodnotu

$$\Delta\varphi = D \frac{4\pi}{\lambda},$$

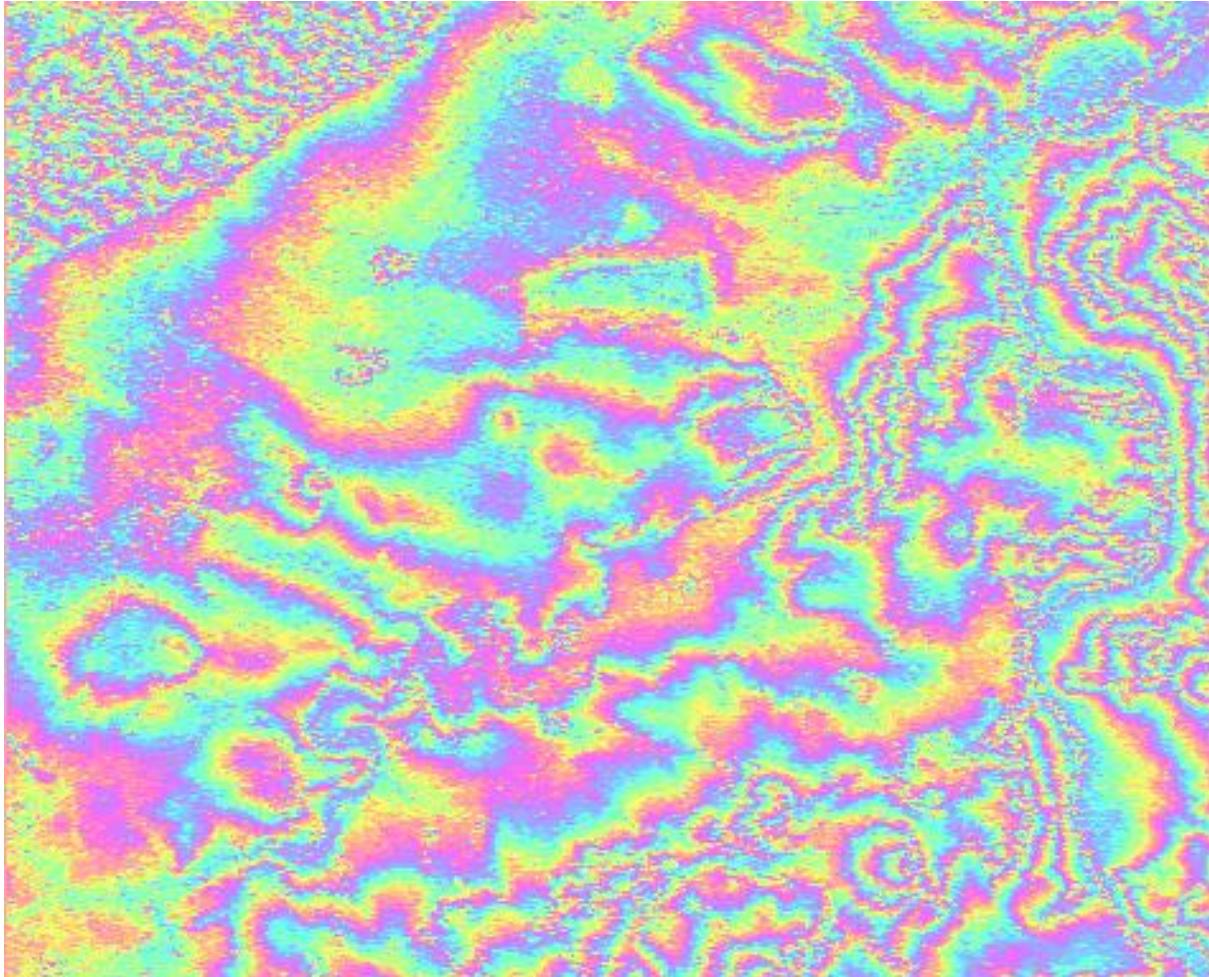
kde  $D$  je velikost deformace ve směru paprsku a  $\lambda$  je vlnová délka radaru. Chyba DEM na druhou stranu vyzvolá změnu fáze o hodnotu

$$\Delta\varphi = D \frac{2\pi}{H_A},$$

kde  $D$  je chyba DEM (opět ve směru paprsku) a  $H_A$  je "altitude of ambiguity", která je v případě našich snímků cca 70 m. Detekce změn DEM je proto ve srovnání s detekcí sesuvů nepřesné.

### 3 Výsledky

Zde uvádíme výsledky zpracování projektu mapování deformací v oblasti Chabařovic, která je známa svými poměrně velkými sesovy. Kromě toho jsou tu interferogramy celé severočeské pánve. Všechny obrázky jsou z praktických důvodů v nízkém rozlišení; obrázky v plném rozlišení najdete na [4].



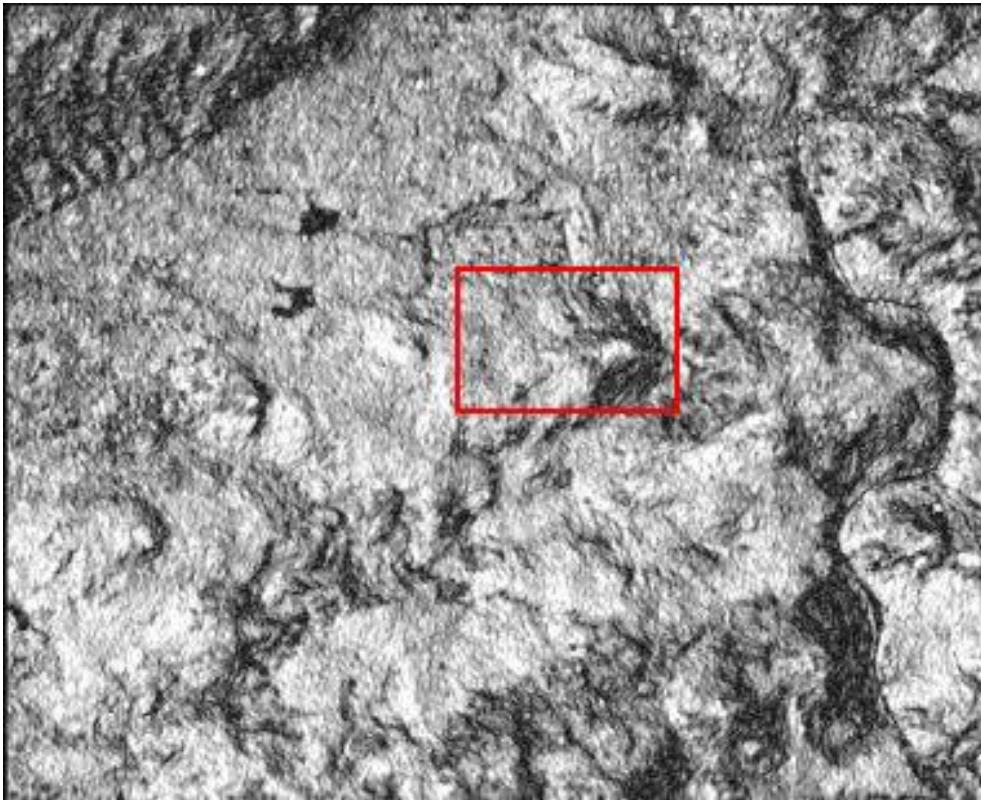
Obrázek 1: Interferogram ze snímků ze 7. a 8. března 1999 s odečtenou fází elipsoidu

Z obrázků 5 a 6 je vidět, že "náklon", způsobený chybami orbit, je větší v případě two-pass metody: z toho plyne, že chyba ve velikosti základen obou páru se částečně kompenzuje.

Zájmové území, naznačené červeně, je v obrázcích 6 a 5 téměř celé dekorelované. Je to pravděpodobně způsobeno jak vegetací (přestože snímky pocházejí ze zimního období), tak i většími pohyby ve směru letu. Je to především znatelné v rozdílu koherenčních obrazů 2 a 3, kde je koherence v topografickém interferogramu dobrá, zatímco koherence deformačního páru je špatná ve větší části zájmového území.

Nicméně v obrázku 6 je vidět více "barevných fleků", nasvědčujících deformaci. Rozdíl v dekorelací je téměř zanedbatelný, protože, jak je vidět z obrázků 2 a 3, koherence topografického interferogramu při odečtení topografie téměř nezhorší koherenci interferogramu deformačního.

Obrázky 7 a 8 demonstруjí vliv chyb v orbitách na interferogram: vznikají interferometrické proužky, které jsou chybou v odečtení fáze elipsoidu. I v obrázku 7 je patrné jisté naklonění, i když ne tak výrazné jako v obrázku 8.



Obrázek 2: Kohärenzinterferogramm ze snímků ze 7. a 8. března 1999. Červeně je zobrazeno zájmové území.

V obrázcích 10 a 9 jsou vidět barevné flíčky odpovídající pravděpodobně polím (jsou přesně ohraničené). Jsou i mírně dekorelované, ale změna fáze je zde velmi pravděpodobná. Tento jev přičítáme odlišnému hospodaření na různých polích, tedy jinému zalévání a následkem toho jiným vlastnostem půdy (v důsledku jiného hospodaření je možný i pokles půdy).

## 4 Problémy

Nejdůležitějším problémem našeho projektu je nedostatek dat — nelze tedy ověřit, zda se barevné "fleky" objevují i na snímcích s jinou časovou základnou a k nějakým změnám tam dlouhodobě dochází. Hodláme provést výběr nových dat, tentokrát z družice ENVISAT.

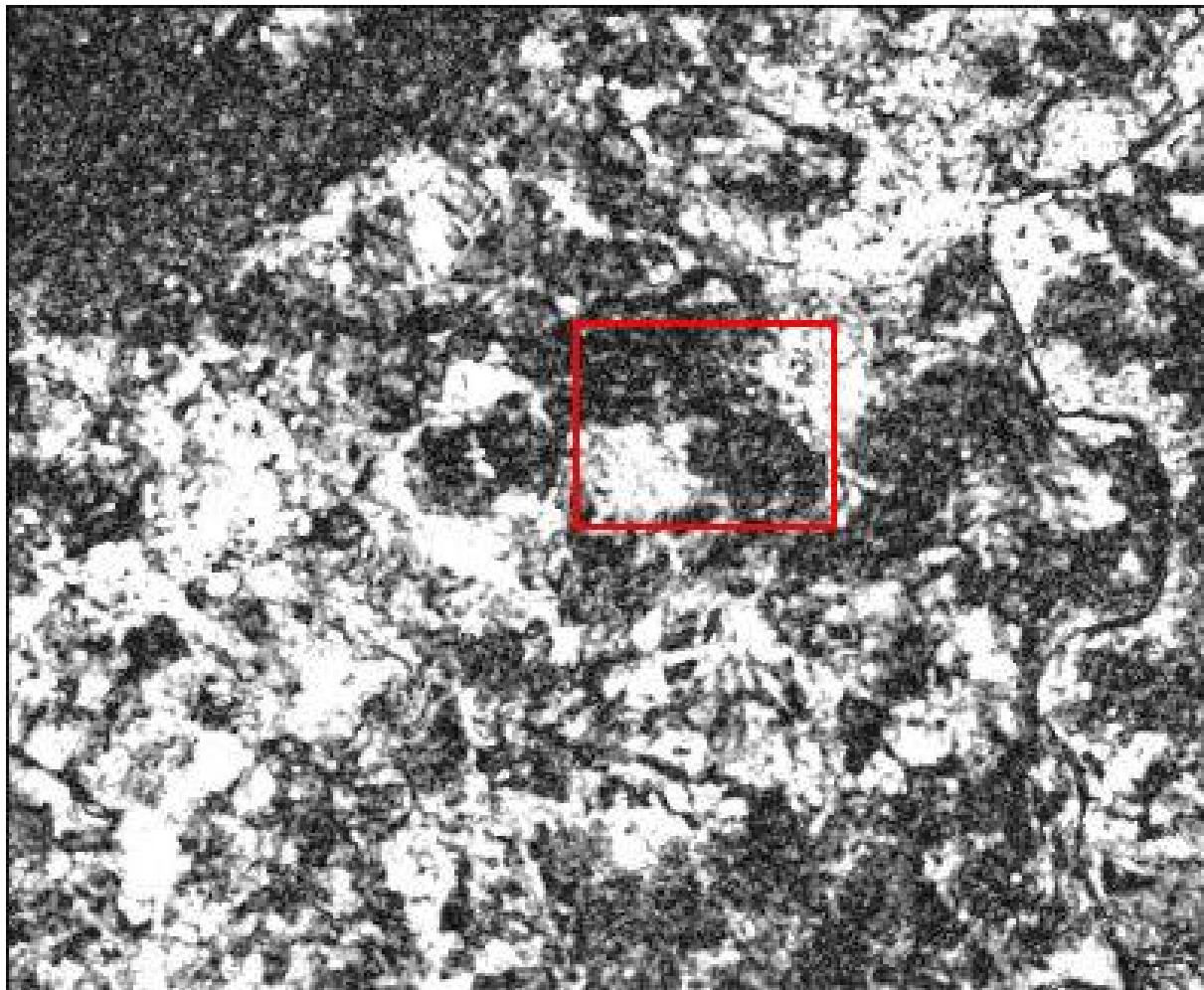
Dalším problémem je koregistrace snímků z let 2002 a 2003. Domníváme se, že tento problém je dán tím, že snímkы pocházejí z mírně nerovnoběžných orbit a jsou tedy navzájem mírně pootočené. Zpracování takovýchto snímků je náročnější, v softwaru DORIS není implementováno a ani my jsme je dosud neimplementovali.

Mensím problémem jsou chyby orbit, které jsou vidět v interferogramech severočeské pánve jako proužky (nepřesně odečtená fáze elipsoidu): zdá se, jako by byla celá oblast nakloněna. Toto lze opravit např. vyrovnaním interferogramu na rovinu, které se nám podařilo realizovat v zájmovém území; nicméně tato metoda předpokládá rozbalení interferogramu, které se v případě celé pánve nepodařilo realizovat. Lze použít i jiné metody, založené na počtu proužků na interferogramu; tyto metody plánujeme implementovat v nejbližší době.

Očekáváme, že malé změny bude ve "vyrovnaném" interferogramu pak vidět lépe.

## 5 Poděkování

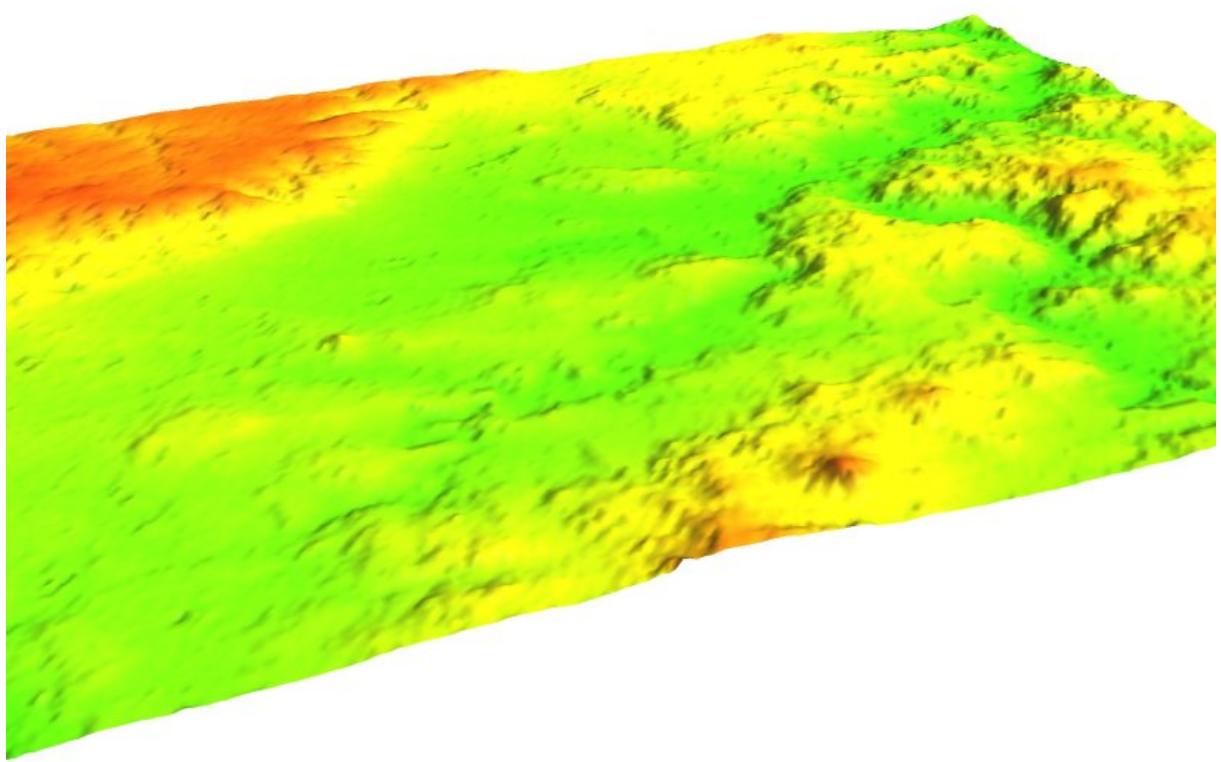
Děkuji agentuře ESA za poskytnutí dat pro projekt (v rámci Category 1 project) a skupině DEOS z TU Delft za poskytnutí přesných druhých drah družic.



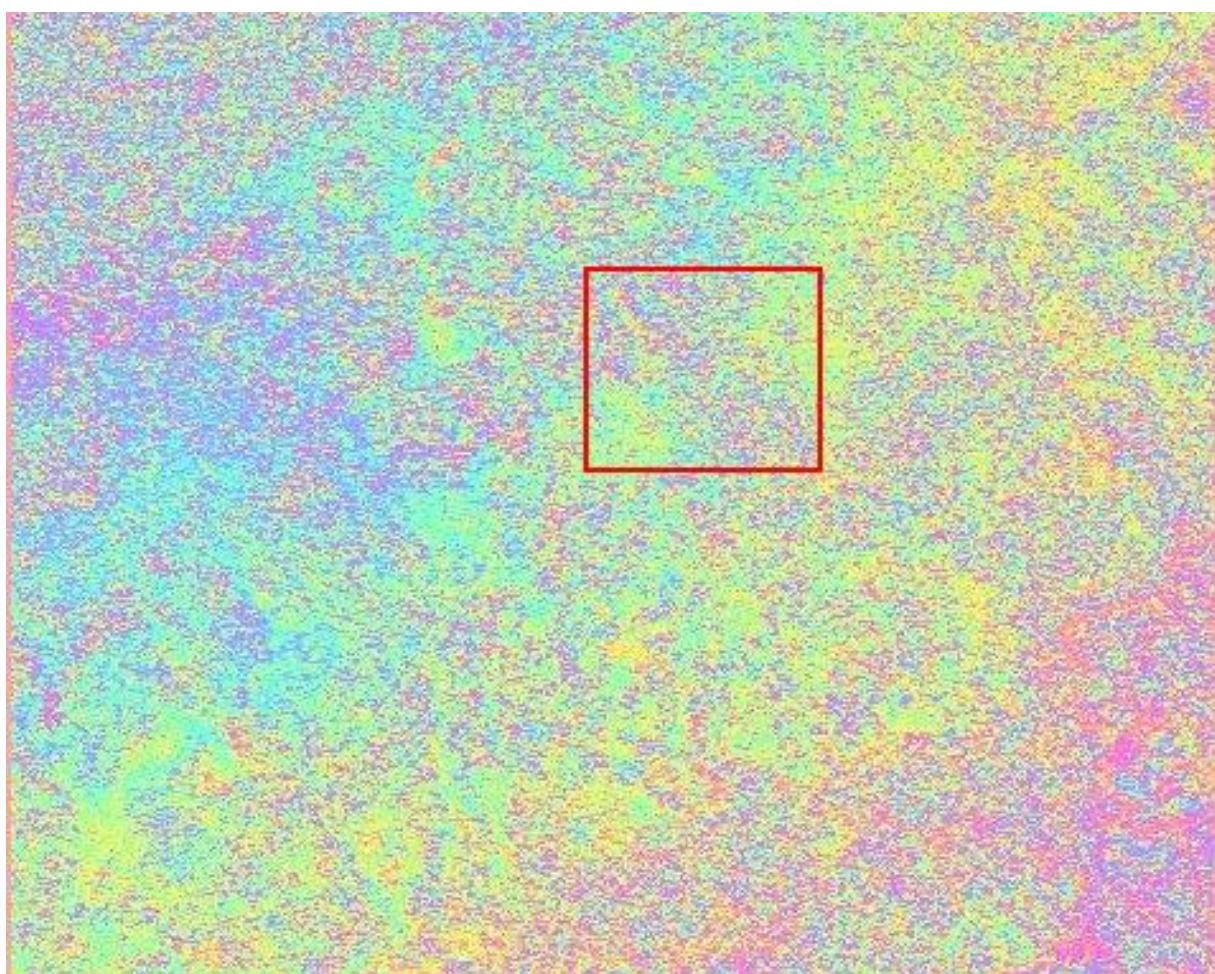
Obrázek 3: Koherence interferogramu ze snímků z 8. března 1999 a 28. prosince 1998. Červeně je zobrazeno zájmové území.

## Reference

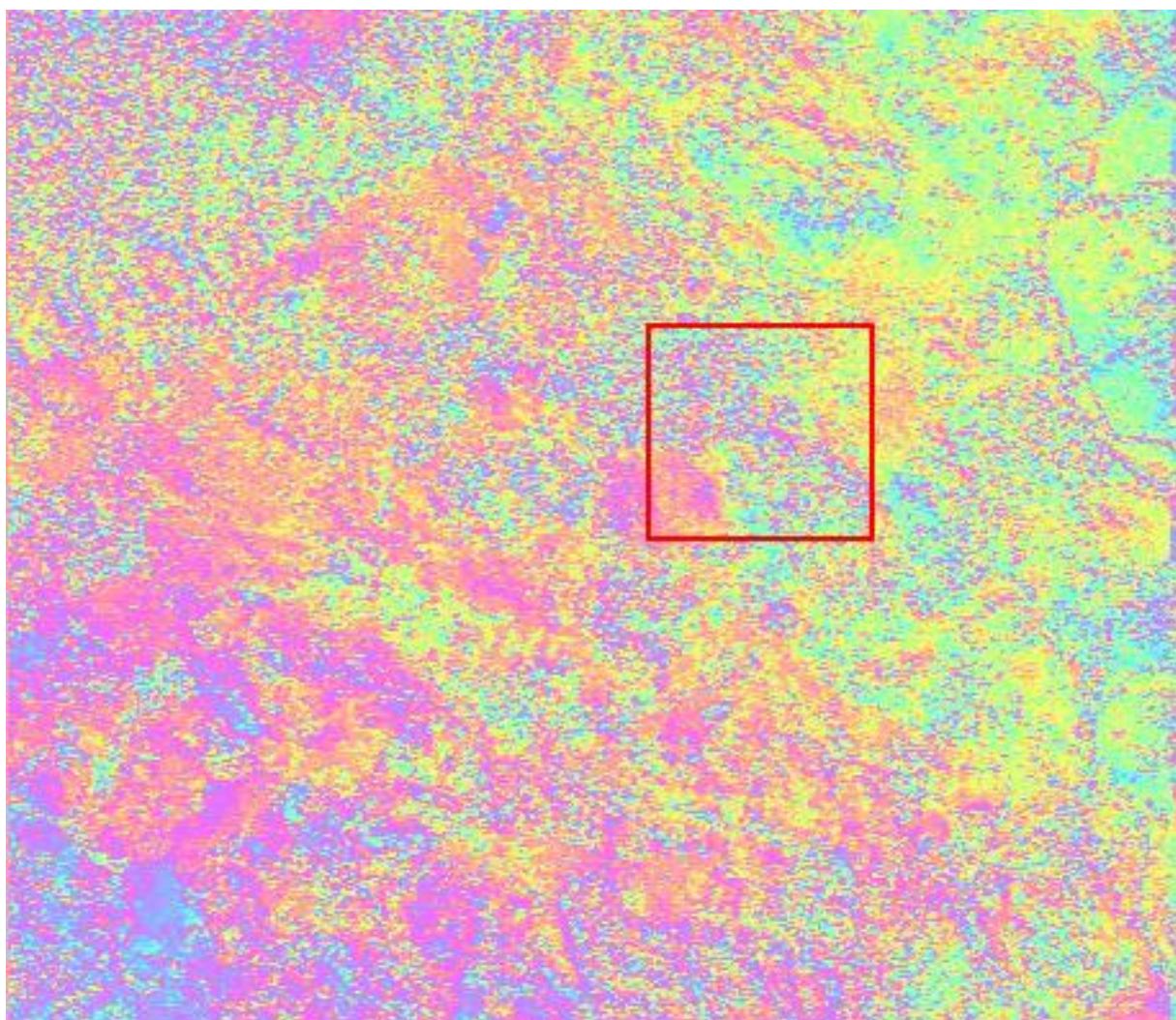
- [1] Bert Kampes and Stefania Usai. Doris: The Delft Object-oriented Radar Interferometric software. In: proceedings ITC 2nd ORS symposium, August 1999.
- [2] Dennis C. Ghiglia, Mark D. Pritt: Two-Dimensional Phase Unwrapping (Theory, Algorithms, and Software), John Wiley & Sons, Inc., 1998
- [3] Rabus, Eineder, Roth, Bamler: The shuttle radar topography mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 57 (2003): 241–262
- [4] Výsledky projektu mapování deformací v severních Čechách, <http://gama.fsv.cvut.cz/ivana/sc/>



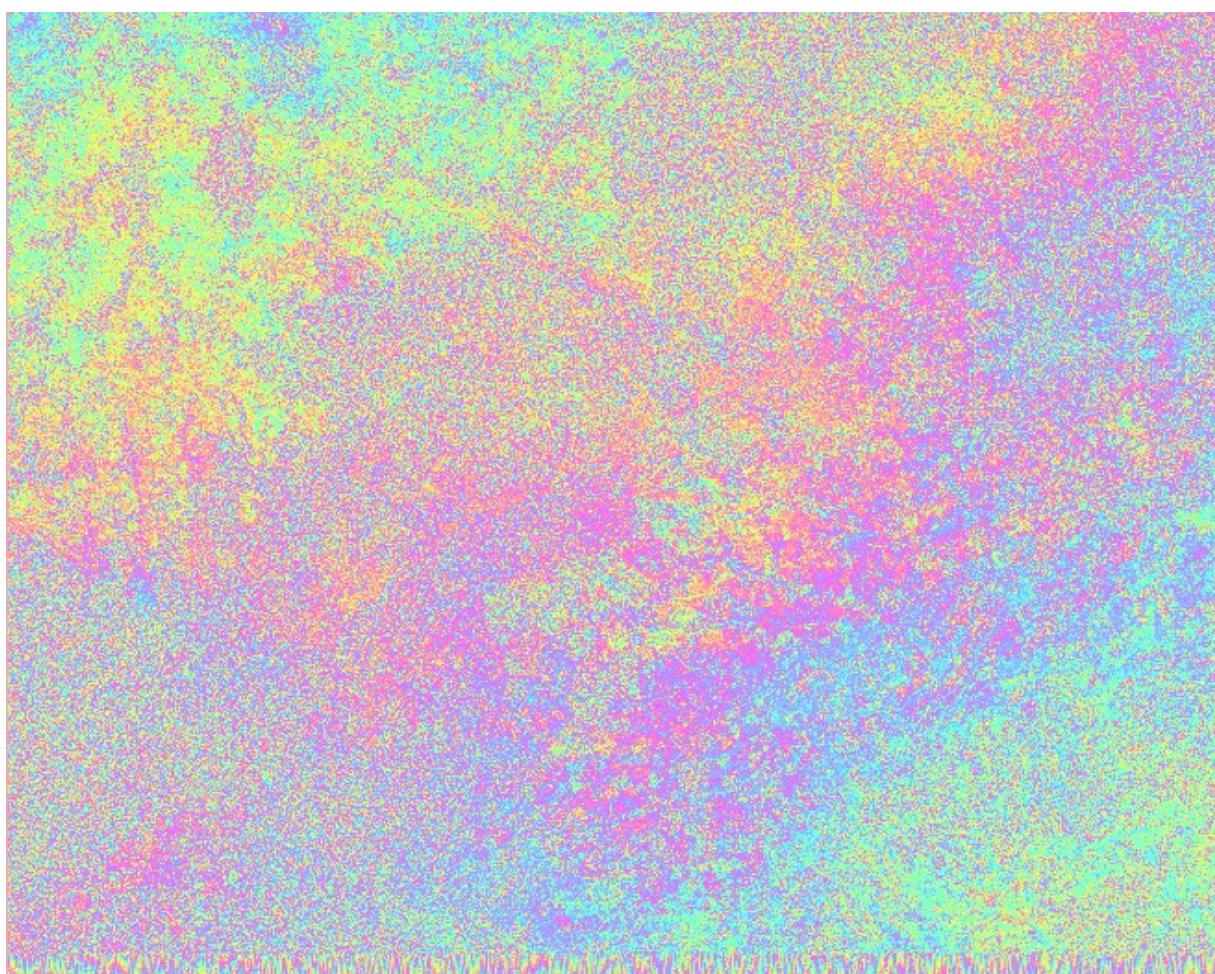
Obrázek 4: Vizualizace digitálního modelu terénu získaného z interferogramu na pbrázku 1



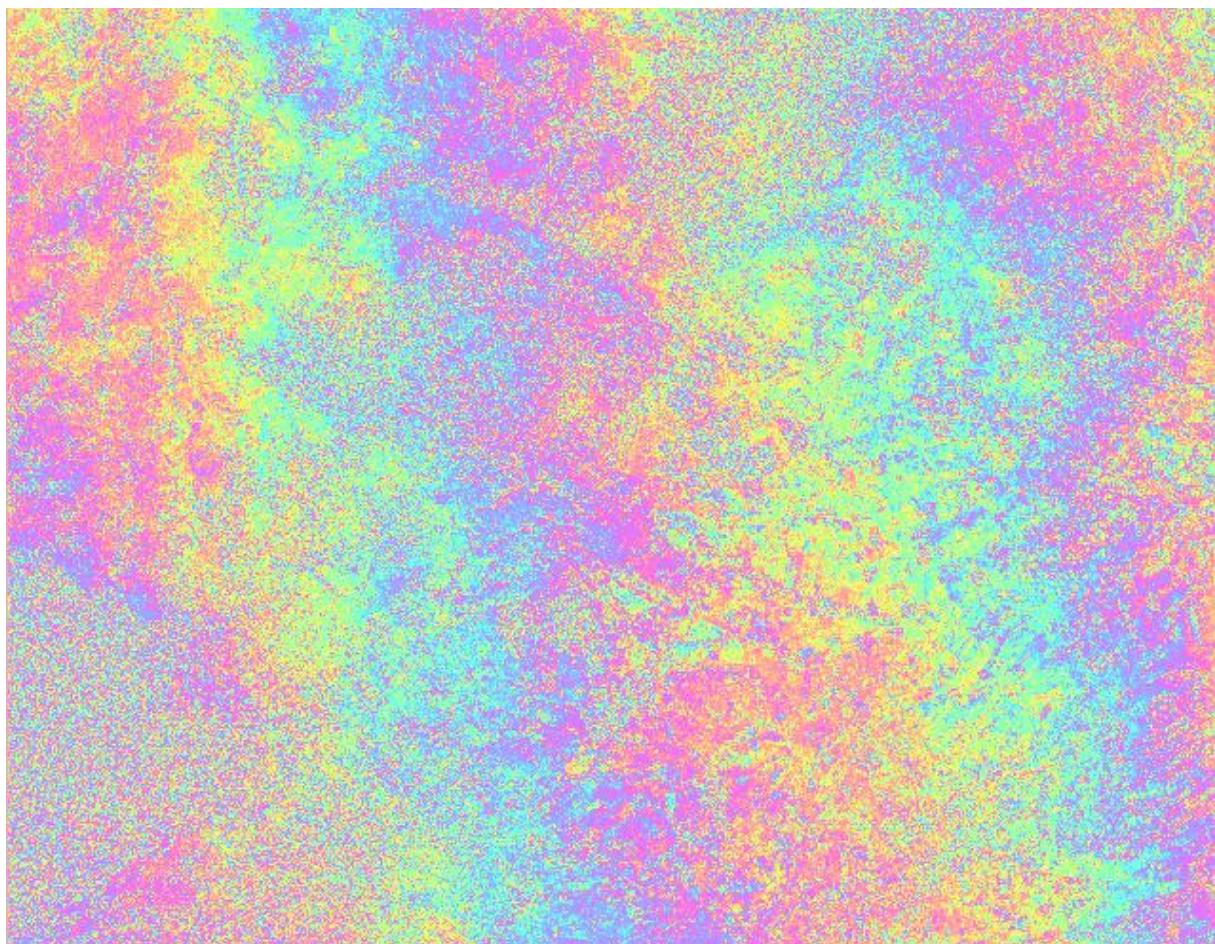
Obrázek 5: Interferogram ze snímků z 28. prosince 1998 a 8. března 1999 s odečtenou fází elipsoidu a topografií (three-pass metoda, zájmové území)



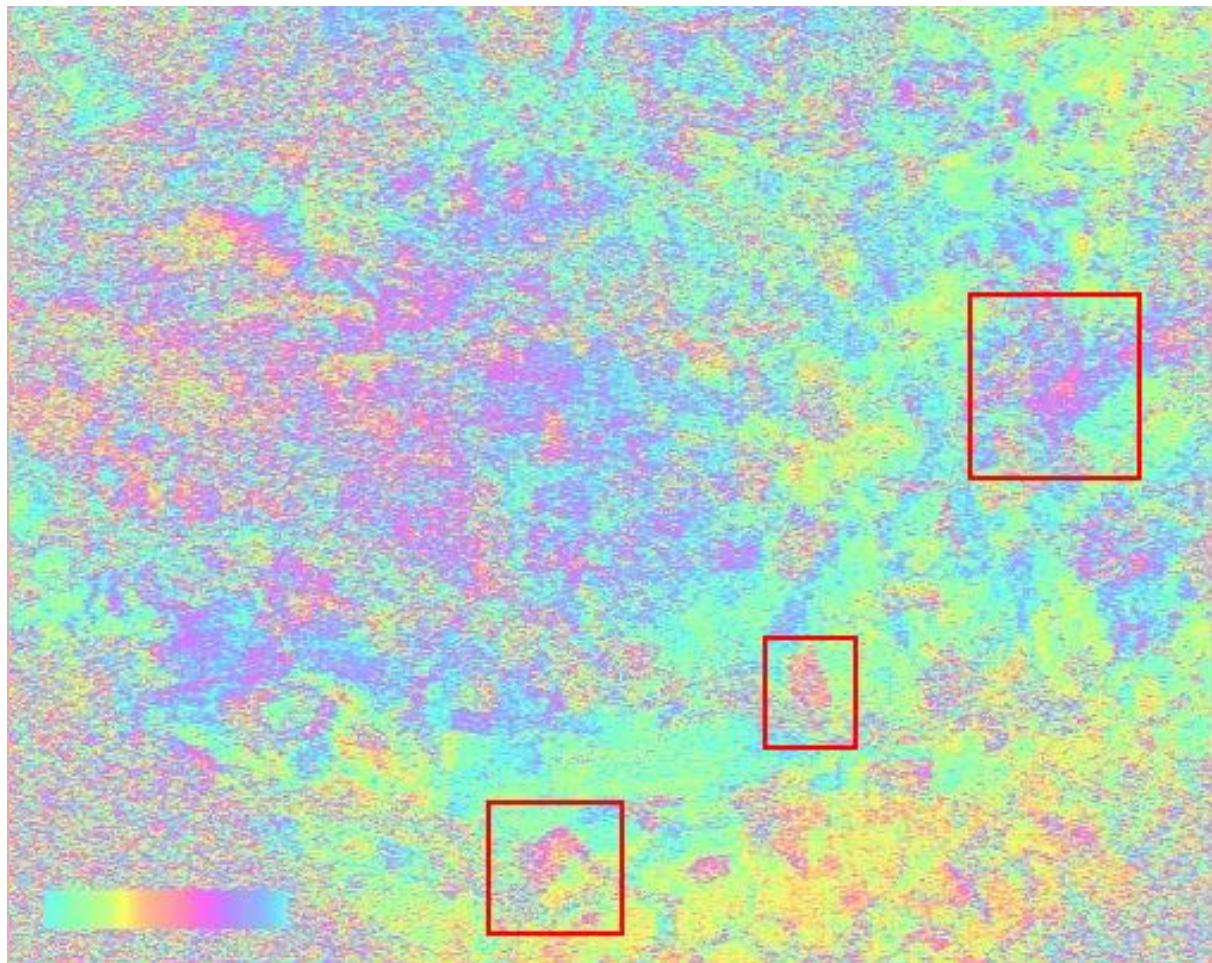
Obrázek 6: Interferogram ze snímků z 28. prosince 1998 a 8. března 1999 s odečtenou fází elipsoidu a topografií (two-pass metoda, zájmové území)



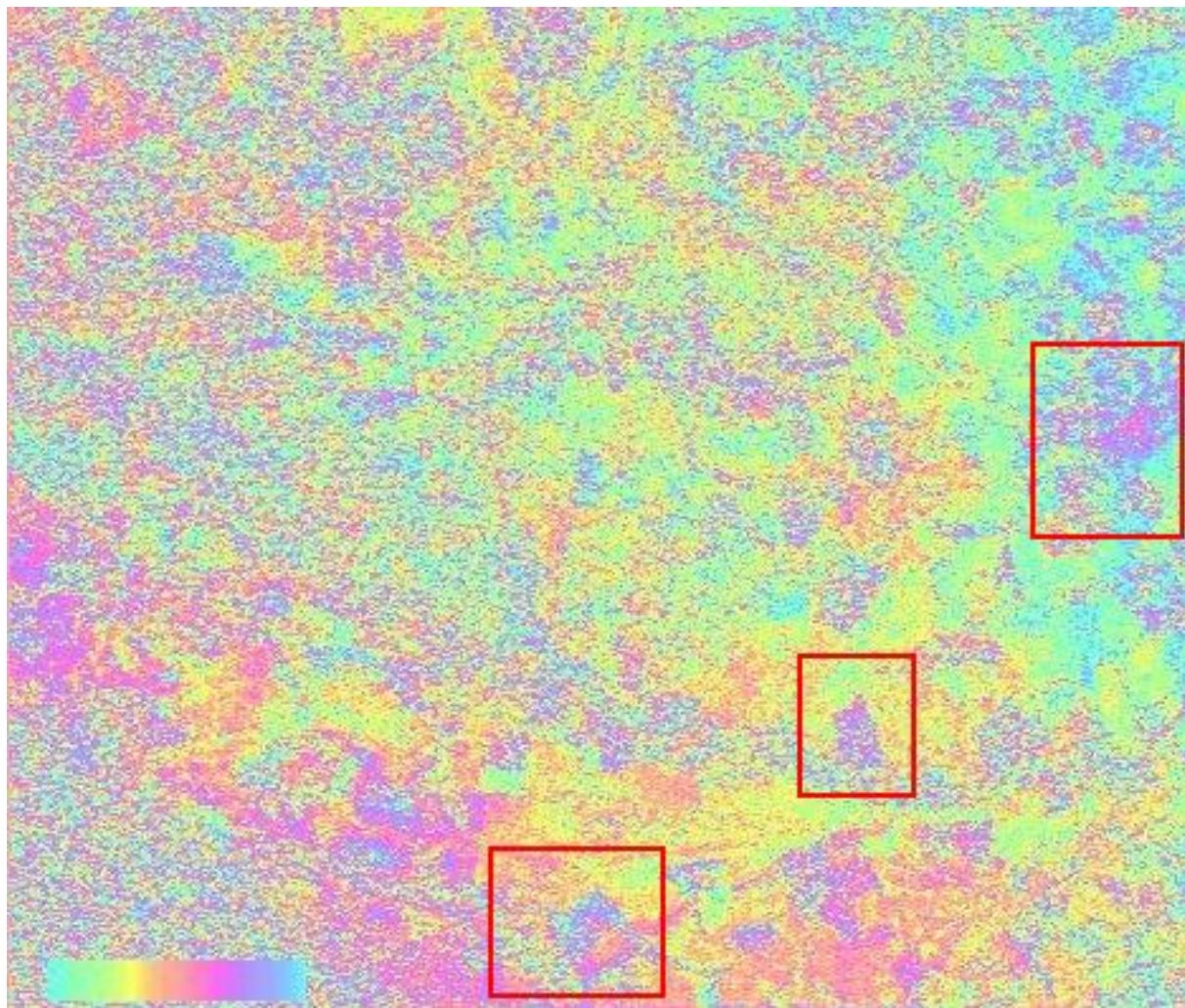
Obrázek 7: Interferogram ze snímků z 28. prosince 1998 a 8. března 1999 s odečtenou fází elipsoidu a topografií (three-pass metoda, celá severočeská pánev)



Obrázek 8: Interferogram ze snímků z 28. prosince 1998 a 8. března 1999 s odečtenou fází elipsoidu a topografií (two-pass metoda, celá severočeská pánev)



Obrázek 9: Interferogram ze snímků z 28. prosince 1998 a 8. března 1999 s odečtenou fází elipsoidu a topografií (three-pass metoda, jižní část severočeské pánve)



Obrázek 10: Interferogram ze snímků z 28. prosince 1998 a 8. března 1999 s odečtenou fází elipsoidu a topografií (two-pass metoda, jižní část severočeské pánve)