

Družicová radarová interferometrie pro sledování deformací

Milan Lazecký¹, Pavel Bláha²

¹ VŠB-TU Ostrava, IT4Innovations, Ostrava – milan.lazecky@vsb.cz

² Geotest a.s., Brno – blaha@geotest.cz

Abstrakt

Radarová interferometrie je moderní technika dálkového průzkumu určená především pro sledování změn reliéfu terénu či deformací staveb. Tzv. interferogram vzniká ze dvou radarových (SAR) snímků určitého území vytvořených s vhodným časovým odstupem. Diferenční metoda DInSAR kombinuje dva SAR snímky a pokouší se o filtrování veškerých ostatních vlivů na radarový signál, mimo sledovanou deformaci (jako je vliv topografie, zakřivení Země apod.). Výsledný obraz interferogramu zachycuje deformace sledovaného území během sledovaného období. Vícesnímkové metody MT-InSAR využívají celé sady interferogramů DInSAR, ze kterých jsou použity pro identifikaci deformačních pohybů v dlouhém časovém období jen vhodné vybrané body.

Klíčová slova: radarová interferometrie, sledování deformací, dálkový průzkum Země.

1 ÚVOD

1.1 Techniky družicové radarové interferometrie

Principem technik družicové radarové interferometrie (InSAR) pro sledování změn reliéfu terénu je vytvoření takzvaného interferogramu a jeho případné další zpracování. Prvotní interferogram vzniká ze dvou družicových radarových (SAR) snímků určitého území vytvořených s vhodným časovým odstupem při mírně odlišné poloze družic při snímání, jako rozdíl fázové složky vyslaného a přijatého radarového signálu o určité mikrovlnné délce. V současnosti radarové družice využívají signálu v mikrovlnných pásmech X (2,5-3,75 cm), C (3,75-7,5 cm) anebo L (15-30 cm).

Diferenční metoda DInSAR kombinuje dva SAR snímky a pokouší se o filtrování veškerých nepotřebných fázových složek (jako je vliv topografie, zakřivení Země, systematické chyby, šum a v případě existence vhodných dat i vliv zpoždění signálu atmosférou). Výsledný obraz interferogramu zachycuje terénní změny.

Vícesnímkové metody MT-InSAR využívají celé sady interferogramů DInSAR z mnoha SAR snímků, ze kterých jen vybrané stabilně odražející body jsou použity pro identifikaci deformačních pohybů v dlouhém časovém období. V praxi se tím myslí body typu budova, sloup, skála mimo vegetaci apod. U těchto bodů je možné vyhodnotit deformace v přesnosti často lepší než je 1 mm/rok. Navíc, zpracováním více radarových snímků v řadě je možné minimalizovat vliv některých zdrojů chyb v DInSAR, jako jsou chyby v použitém digitálním výškovém modelu (DEM), chyby v přesné lokalizaci družice při snímání, pixely ovlivněné vegetací a jejím pohybem či vliv atmosféry.

1.2 Družice s radarem

První družice, která umožnila systematicky monitorovat terénní deformace pomocí instrumentu SAR (Synthetic Aperture Radar), byla družice ERS-1, na oběžné dráze od roku 1991. Následovaly další družice podobných parametrů operujících v pásmu C (ERS-2, Envisat, Radarsat). Radar v pásmu L na palubě japonské JERS-1 (od 1992) potvrdil vhodnost použití signálu o nižší frekvenci pro interferometrii (především z hlediska penetrace vlny přes vegetační pokryv) – od roku 2006 do dubna 2011. Proto bylo použití tohoto pásma obnoveno na družici Alos-1, která je od roku 2014 pokračována družicí Alos-2. Ze studií využití naopak kratších vln radiového pásma X se vycházelo pro konstrukci nových instrumentů, kterými jsou od r. 2007 radary SAR o velmi vysokém rozlišení (i lepším než je jeden metr) na palubě TerraSAR-X či Cosmo.

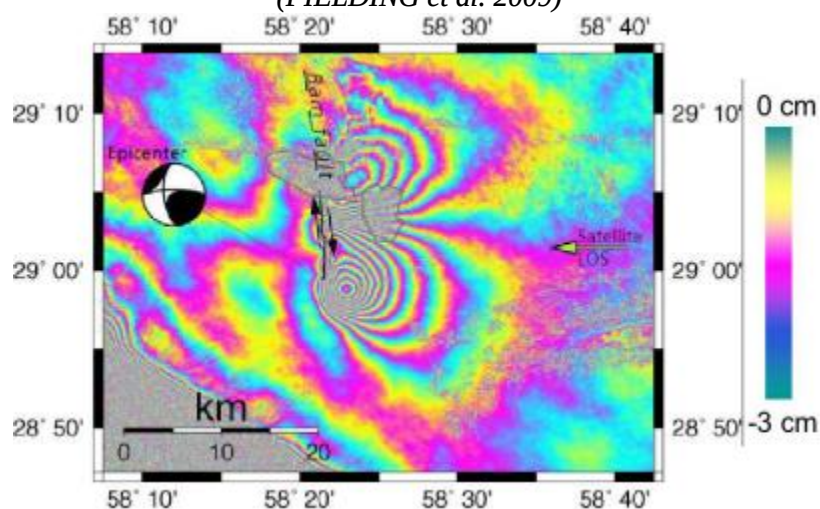
Dlouho očekávaná evropská družicová mise Sentinel-1 s radarem pásma C na palubě od července 2014 dodává pravidelné snímky celého území EU s krátkou periodou 12 dnů a rozlišením 5×20 m, které je pro oblasti zvláštního významu možno zvýšit na 5×5 m. Data jsou pro členské státy EU k dispozici bezplatně. Touto družicí nastává v Evropě nová éra nejen pro sledování deformací a jiných pohybů objektů a evropských lokalit významných z hlediska inženýrské geologie či hydrogeologie.

2 MOŽNOSTI SLEDOVÁNÍ DEFORMACÍ

Celkově zaznamenaly SAR družice velký úspěch a široké využití při sledování projevů zemětřesení, vulkanické činnosti, svahových deformací, poklesů a jiných deformací terénu či samostatných objektů, tvorbě digitálních modelů terénu, sledování ledovcových pohybů, olejových skvrn na moři anebo vojenském sledování.

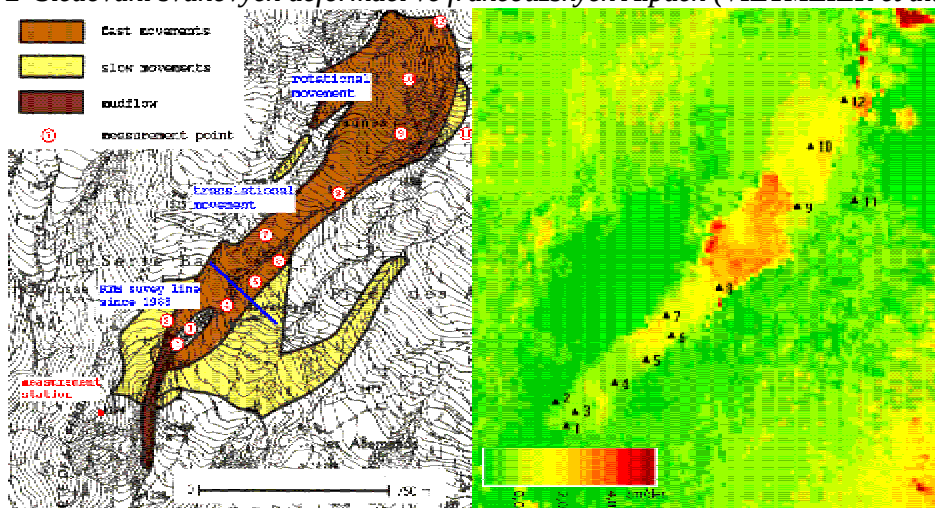
Při sledování zemětřesení se jednak sledují rizikové oblasti a jedna se zjišťuje velikost deformace po proběhlém zemětřesení. V prvním případě se sleduje, zda v některých místech nedochází k dílčím posuvům, ať horizontálním nebo vertikální. První ukázka na obrázku 1 představuje interferogram ze zemětřesení v Bamu (Irán). Zemětřesení postihlo oblast větší než 50×50 km. K největším pohybům došlo východně od Bamského zlomu. Zajímavá je skutečnost, že největší rozdíly v deformacích nebyly zjištěny na rozdílých stranách zlomu, ale na sever a jih od města Bam. Zatímco oblast severně od Bamu poklesla až o 18 cm, jižně od města došlo k výzdvihu oblasti o 30 cm (hodnoty jsou vztaženy ke směru družicového pohledu, tj. cca 23° od nadiru).

Obr. 1 Zemětřesení v Bam, Irán – interferogram z dat Envisat, kombinace 3.12.2003-7.1.2004 (FIELDING et al. 2009)



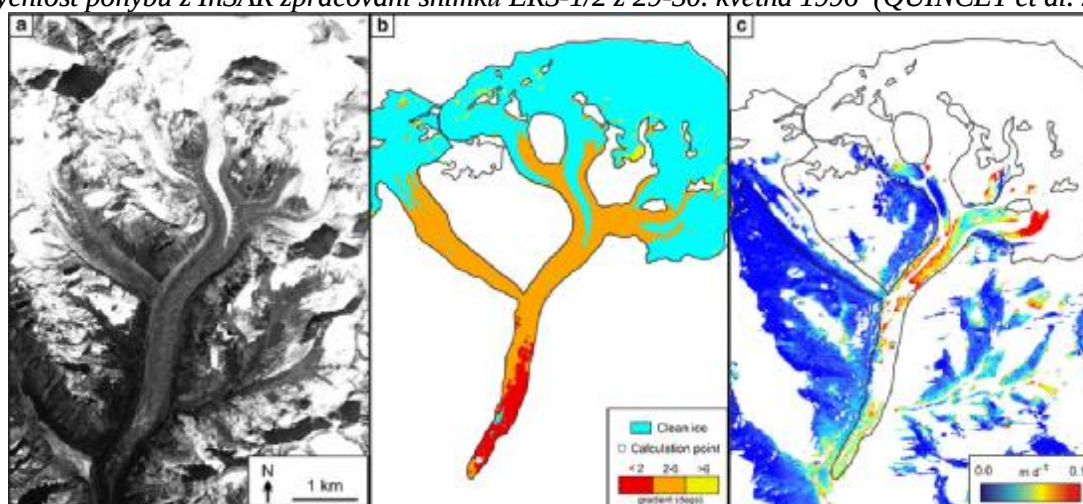
Další ukázka (obr. 2) je ze sledování svahových deformací, v tomto případě při použití metody MT-InSAR. Ukázka je ze svahové deformace La Vallette v blízkosti města Barcelonnette ve francouzských Alpách. V levé části obrázku je mapa sesuvu, v pravé části deformace zjištěné mezi oblety satelitů ERS1 a ERS2 v srpnu 1996. Z výsledků radarové interferometrie je patrné, že největší deformace byly zjištěny v blízkosti odlučné hrany sesuvu, a pak v jeho střední části, kde dochází k zúžení těla sesuvu.

Obr. 2 Sledování svahových deformací ve francouzských Alpách (VIETMEIER et al. 1999)



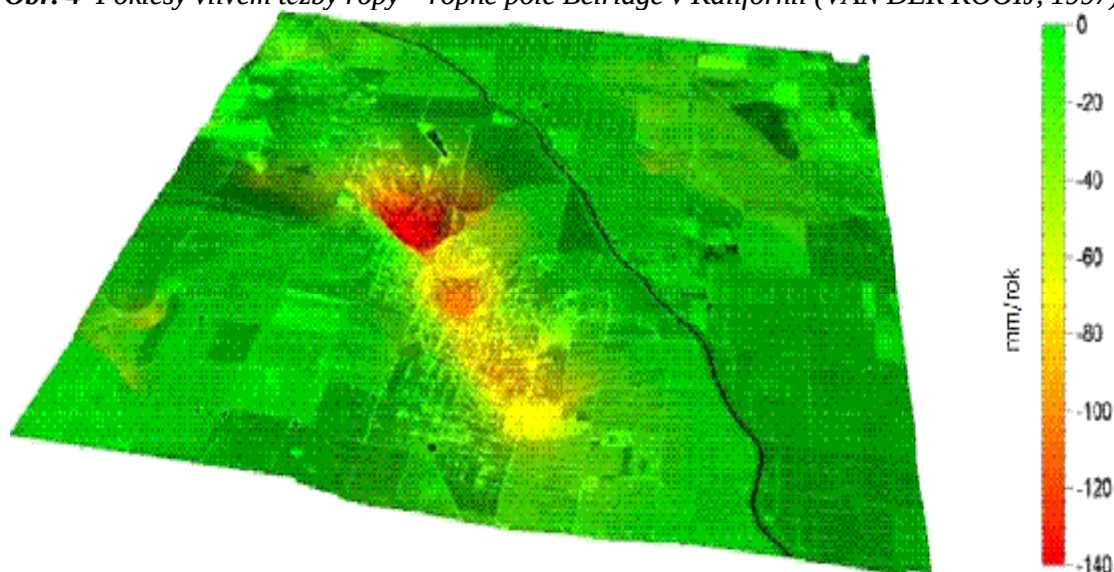
Na obrázku 3 je ukázka z vyhodnocení rychlosti pohybu ledovce v Himalájích pomocí jediného páru SAR snímků družic ERS-1/2 s jednodenním časovým odstupem z března roku 1996. Interferogram zachytil pohyby ledovce během 24 hodin. Pomocí znalosti výškových gradientů z digitálního modelu terénu (DEM) pak bylo možné naměřené hodnoty pohybů přepočítat podle směrů gradientů sklonu ledovce. Byly tak interpretovány pohyby o rychlosti až okolo 10 cm/den, což odpovídá rychlosti 35 m/rok.

Obr. 3 Pohyb ledovce G1 v Himalájích: a) snímek ledovce pomocí SPOT-5 HGR, b) gradient ledovcového povrchu získaný z DEM, c) rychlost pohybu z InSAR zpracování snímků ERS-1/2 z 29-30. května 1996 (QUINCEY et al. 2007)



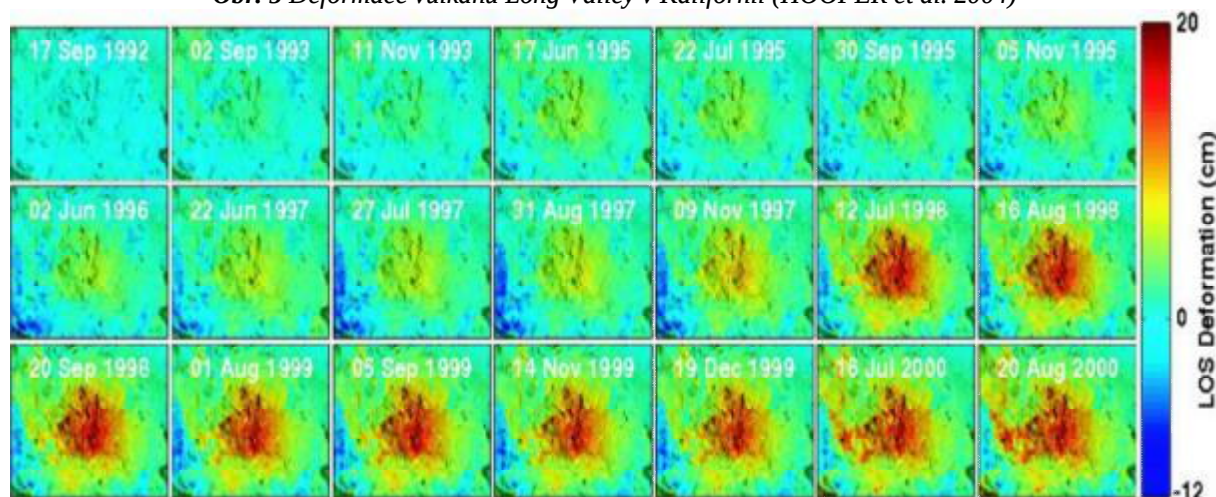
Další ukázka je určení poklesů terénu z těžby ropy v oblasti ropného pole v Belridge v Kalifornii. Pro popis poklesové kotliny byla použita data z radarové interferometrie z družice ERS a RADARSAT-1. Na tomto území mimo monitoring radarovou interferometrií probíhal i geodetický monitoring s použitím GPS. Výsledky radarové interferometrie velmi dobře korelují s geodetickými měřeními. Na obrázku 4 jsou poklesy zjištěné za období od 17. září do 26. listopadu 1992. Z obrázku je patrné, že radarovou interferometrií je možné sledovat i poklesy přesahující decimetr za rok. Jednoznačné jsou již výškové změny přesahující svou amplitudou první centimetry za rok. Bohužel v originálním materiálu není horizontální měřítko, takže není možné si učinit představu o skutečné velikosti poklesávající plochy.

Obr. 4 Poklesy vlivem těžby ropy – ropné pole Belridge v Kalifornii (VAN DER KOOIJ, 1997)



Následující ukázka je z použití radarové interferometrie při sledování vulkanické činnosti. Na pátém obrázku je vývoj kaldery vulkánu Long Valley (Kalifornie). Na jednotlivých snímcích můžeme sledovat výzdvih kaldery od 17. září 1992 do 20. srpna 2000. Od počátku měření v roce 1992 vidíme pozvolný výzdvih kaldery až do konce roku 1997, přibližně o devět centimetrů. Mezi měřeními 9. listopadu 1997 a 12. července 1998 došlo k náhlému zvětšení deformace o dalších devět centimetrů. V dalším časovém období výzdvih ustal, ba dokonce došlo k určitému poklesu maxima deformace asi o čtyři centimetry. Tento pokles je na druhé straně eliminován plošným rozšířením části kaldery, na které dochází k výzdvihu.

Obr. 5 Deformace vulkánu Long Valley v Kalifornii (HOOPER et al. 2004)



3 OMEZUJÍCÍ FAKTORY

3.1 Vliv geometrie družicového snímání

Ač přes nesporné výhody pravidelného radarového snímání z družic, které umožňuje celoplošné vyhodnocení deformací v širokém rozsahu a vysoké citlivosti, má technologie svá úskalí a omezující faktory, které vycházejí především s charakteru snímání.

Z technologických důvodů je směr družicového pohledu vždy odchýlený od vertikálního směru (od nadiru) do určitého úhlu, zhruba od 20° do 45°. Veškerá měření jsou tedy vztažena k tomuto směru družicového pohledu (LOS). Deformace v LOS sledovaná v dané buňce rozlišení – pixelu může být způsobena jak vertikální tak horizontální deformací, přičemž vyšší citlivost má družicový radar na vertikální směr. Vypočítat skutečnou hodnotu deformace ze směru LOS čili určit skutečný směr deformace je možné zkušeným odhadem, případně využitím komplexního zpracování radarových datových řad vzniklých ze dvou odlišných orbitálních drah (sestupné řady s pohledem na daný pixel např. zleva a vzestupné s pohledem zprava), jejichž kombinace by umožnila rozklad naměřených vektorů deformací do 3D prostoru. Ani v tomto případě však nemusí být odhad přesný, dochází-li k deformaci ve směru paralelním s dráhou družice, tedy zhruba ve směru S-J nebo J-S (podle pohybu satelitu).

Rovněž z důvodu odchýlení pohledu od vertikálního směru mohou vznikat potíže při sledování ve členitém terénu – ať již z důvodu zastínění sledovaných objektů či sníženém rozlišení na přilehlých svazích. Naopak svahy odlehlé družicovému pohledu jsou snímány s rozlišením vyšším (LAZECKÝ 2008).

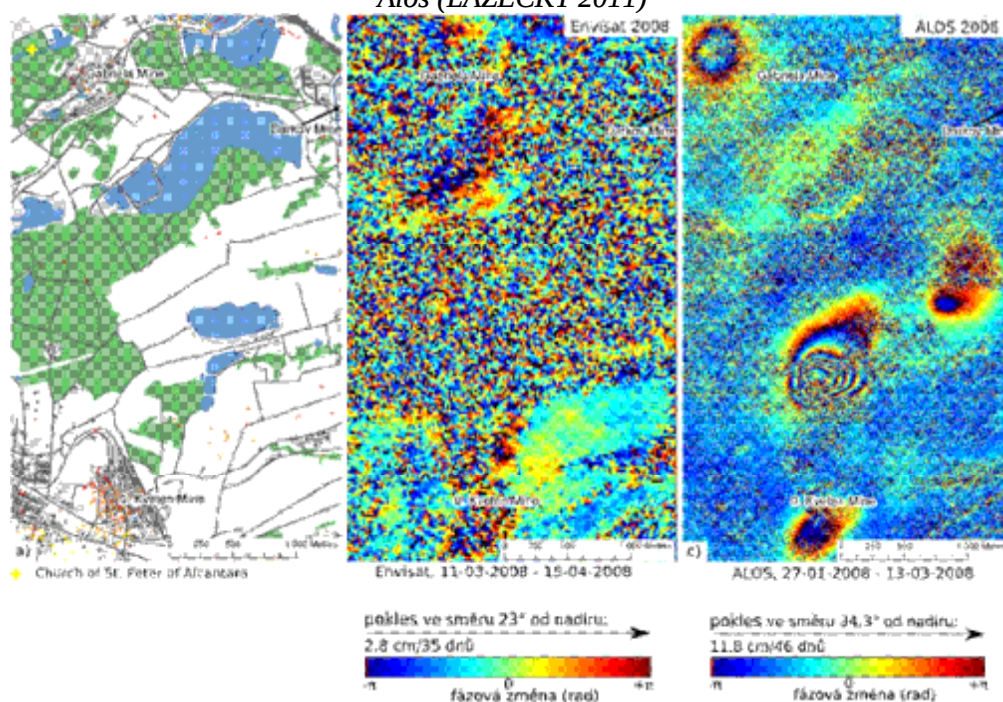
Poslední problém vzniká tím, že interferogram je sestaven kombinací dvou snímků stejné družice, která obléhá po subpolární dráze Zemi. Prakticky nikdy nejsou dva následující průlety satelitu nad sledovanou oblastí po totožné dráze, může vzniknout otázka, jaký má vliv odlišná poloha družice při snímání. V případě, kdy oba snímky vznikly z (téměř) totožné pozice družice v toleranci prvních desítek metrů, je tato kombinace optimální pro sledování deformací. V případě rozdílu pozic v rozmezí stovek metrů obsahuje interferogram kromě deformačního signálu i signál vlivem členitosti terénu – ten se dá odstranit použitím digitálního modelu terénu (DEM), případně je možné naopak tento fakt využít právě pro tvorbu DEM z interferogramu. Liší-li se pozice družic velmi výrazně, může dojít ke ztrátě koherence signálu a není pak možné interferogram vytvořit. Dnešní družice však takovým situacím úspěšně předcházejí.

3.2 Vliv použité vlnové délky

Jak již bylo zmíněno, různé družicové systémy využívají rozdílné frekvence signálu, tedy elektromagnetické vlny o různých vlnových délkách. To má zásadní vliv na použití pro sledování deformací. Deformace je vyhodnocena z fázového rozdílu v rámci periody vlny, proto čím menší je vlnová délka, tím je metoda citlivější k drobným deformačním variacím, ovšem může docházet k problémům při vyhodnocení lokálních deformací, které jsou větší než je délka vlny. Proto je při výběru družicového systému pro sledování nutné brát v úvahu očekávanou míru deformací v čase i prostoru.

Rovněž platí, že se radarová vlna se odráží od objektů srovnatelných s její délkou, a proto například vlna pásma X o délce 3,1 cm bude odrážena od listů vegetace, vlna pásma C o délce 5,5 cm se odrazí od větví stromů, zatímco vlna pásma L o délce 23,6 cm prochází vegetací, která pokrývá například klesající terén. Příklad tohoto vlivu je demonstrován na obrázku 6, kde během sledovaného období není detekován pokles v zalesněném území družicí Envisat (pásmo C), zatímco jsou poklesové kotliny viditelné družicí Alos (pásmo L).

Obr. 6 Sledování poklesových kotlin na území pokrytém vegetací prostřednictvím družic Envisat a Alos (LAZECKÝ 2011)



3.3 Další vlivy

Ačkoli radarový signál prostupuje atmosférou, a to i skrz hustou oblačnost, má aktuální složení atmosféry vliv na rychlost přenosu signálu. Například bouřkový mrak může radarový signál zpomalit a způsobit tak ve výsledném interferogramu artefakty, které mohou být špatně interpretovány jako vlivy deformace. Podobně je tomu s výkyvy dalších veličin, jako například s atmosférickým tlakem. Tyto vlivy jsou však prakticky zanedbatelné, s výjimkou oblastí se značnými výškovými rozdíly. Tyto a další uvedené i neuvedené chybové faktory ve sledování deformací mohou být identifikovány pomocí dlouhé časové řady radarových snímků zpracované pokročilými metodami, především založenými na Permanent Scatterers Interferometry (FERRETI et al., 2001).

ZÁVĚR

Technologie družicové radarové interferometrie má již jistou dobu ve světě široké uplatnění pro sledování deformací. Přes jistá omezení umožňuje sledovat dlouhodobé, ale i časově nárazové jevy. Od roku 1991 jsou data z měření všech satelitů, pokrývající většinu zemského povrchu, ukládána do archivu. Jednotlivé snímky či jejich řady jsou pak za úplatu k dispozici badatelům pro řešení jejich problémů.

Tato práce byla podpořena Evropským fondem regionálního rozvoje (ERDF) v rámci projektu Centra excellence IT4Innovations (CZ.1.05/1.1.00/02.0070). Tato práce byla vypracována v rámci projektu Nové kreativní týmy v prioritách vědeckého bádání, reg. č. CZ.1.07/2.3.00/30.0055 podpořeného Operačním programem Vzdělávání pro konkurenceschopnost a spolufinancovaného Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

LITERATURA

FERRETTI, A., PRATI, C., ROCCA, F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38.5, 2000, pp. 2202–2212.

FIELDING, E. J., LUNDGREN, P. R., FUNNING, G. J. Shallow fault-zone dilatancy recovery after the 2003 Bam earthquake in Iran. *Nature*, vol. 458, no. 7234, 2009, pp. 64–68.

HOOPER, A., ZEBKER, H., SEGALL, P., KAMPES, B. A New Method for Measuring Deformation on Volcanoes and Other Natural Terrains Using InSAR Persistent Scatterers. *Geophys. Res. Letters*, 31, L23611, 2004, doi:10.1029/2004GL021737.

LAZECKÝ, M. *Monitoring of Terrain Relief Changes using Synthetic Aperture Radar Interferometry: Application of SAR Interferometry Techniques in a Specific Undermined Ostrava-Karviná District – disertační práce*. VŠB-TUO, Ostrava: 2011.

QUINCEY, D.J., RICHARDSON, S.D., LUCKMAN, A., LUCAS, R.M., REYNOLDS, J.M., HAMBREY, M.J., GLASSER, N.F. Early recognition of glacial lake hazards in the Himalaya using remote sensing datasets. *Global and Planetary Change* 56 (1-2), 2007, pp. 137–152.

VAN DER KOOIJ, M. W. A. Land subsidence measurements at the Belridge oil fields from ERS InSAR data. *Space at the service of our environment, European Space Agency Special Publication*, 414, Part 1, European Space Agency, Paris: 1997, pp. 1853–1858.

VIETMEIER, J., WAGNER, W., DIKAU, R. Monitoring Moderate Slope Movements (Landslides) in the Southern French Alps Using Differential SAR Interferometry. In *Fringe 1999 Workshop: Advancing ERS SAR Interferometry from Applications towards Operations*, ESA, Liege: 1999.