

VYUŽITIE RADAROVEJ INTERFEROMETRIE NA URČOVANIE POSUNOV VD GABČÍKOVO

Juraj Papčo, Matúš Bakoň¹

Abstrakt

Monitorovanie zemského povrchu s využitím umelých družíc má bohatú históriu a významným spôsobom ovplyvnilo chápanie procesov spojených s endogénnou a exogénnou aktivitou na Zemi. Za posledné desaťročia prešla družicová radarová interferometria veľkým technologickým vývojom a stala sa stálou a veľmi dôležitou súčasťou observačných techník určených na detailné pozorovanie časových zmien zemského povrchu. Posledné výskumy nám umožnili prejsť od monitorovania geodynamických javov (napr. zemetrasenia) na veľkých územiach až ku sledovaniu stability malých, ľudskou činnosťou vytvorených stavieb (napr. priehrad, mosty). V príspevku sa venujeme možnosti využitia technológie družicovej radarovej interferometrie, založenej na permanentných, prirodzene vytvorených odrážačoch na stanovenie posunov objektov Vodného diela Gabčíkovo.

1 ÚVOD

Radarová interferometria (InSAR, z angl. Interferometric Synthetic Aperture Radar) predstavuje v súčasnosti jednu z najdynamickejšie rozvíjajúcich sa oblastí diaľkového prieskumu Zeme. Progresívne metódy tejto technológie sa stali dôležitým nástrojom presného určovania a monitorovania deformácií. Techniky radarovej interferometrie nachádzajú uplatnenie napríklad pri geodeticko-geologickom monitorovaní prírodných nebezpečenstiev (zemetrasenia, vulkanická činnosť, zosuvy a poklesy pôdy), pozorovaní pretvorení veľkých ale aj malých stavebných objektov (vodné diela, atómové elektrárne, priemyselné závody, mosty, výškové budovy), tvorbe digitálneho modelu reliéfu, klasifikácii druhov krajiny pokrývky a pri monitorovaní a prieskumoch životného prostredia. Hlavným dôvodom širokého uplatnenia tejto technológie je možnosť využívať družicové radarové merania nezávisle na počasi, dennej alebo nočnej dobe snímkovania, vysokej priestorovej rozlíšiteľnosti a pokrytiu veľkej oblasti jednou snímkou. Dôležitým faktorom je tiež nižšie ekonomické zaťaženie pri zachovaní podobnej presnosti v porovnaní s tradičnými geodetickými metódami.

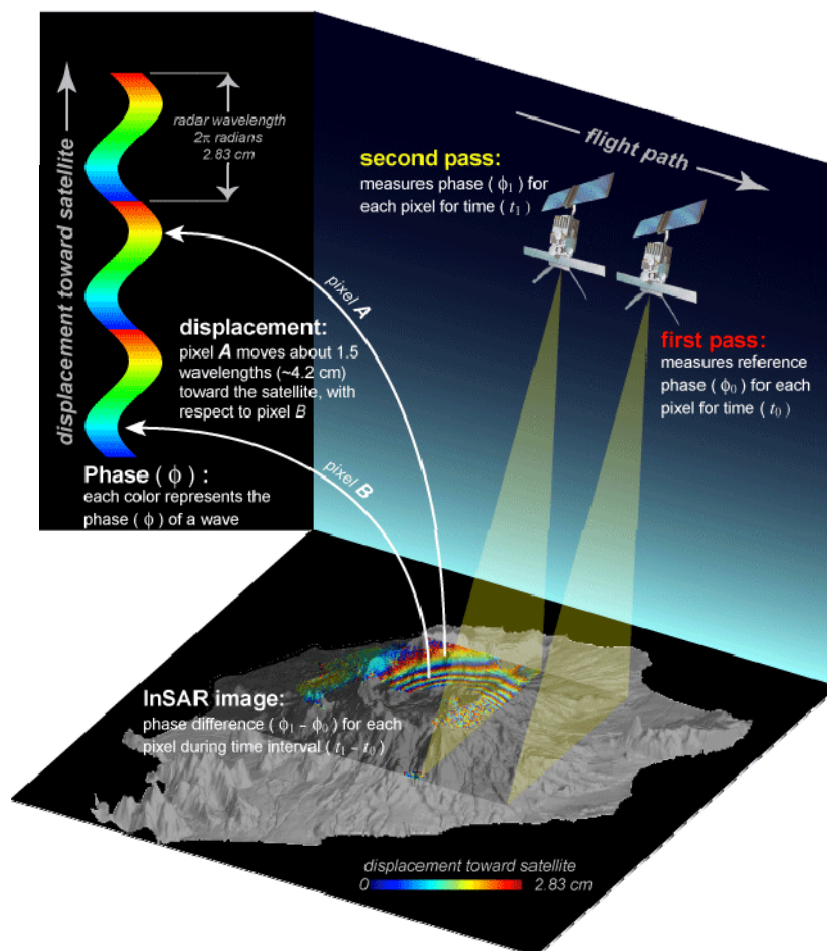
Príspevok sa zameriava na možnosti družicovej radarovej interferometrie s využitím permanentných odrážačov (PSInSAR, z angl. Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar) pri určovaní posunov objektov Vodného diela Gabčíkovo (VD Gabčíkovo). Analýza bola vykonaná na údajoch z družice ENVISAT Európskej vesmírnej agentúry

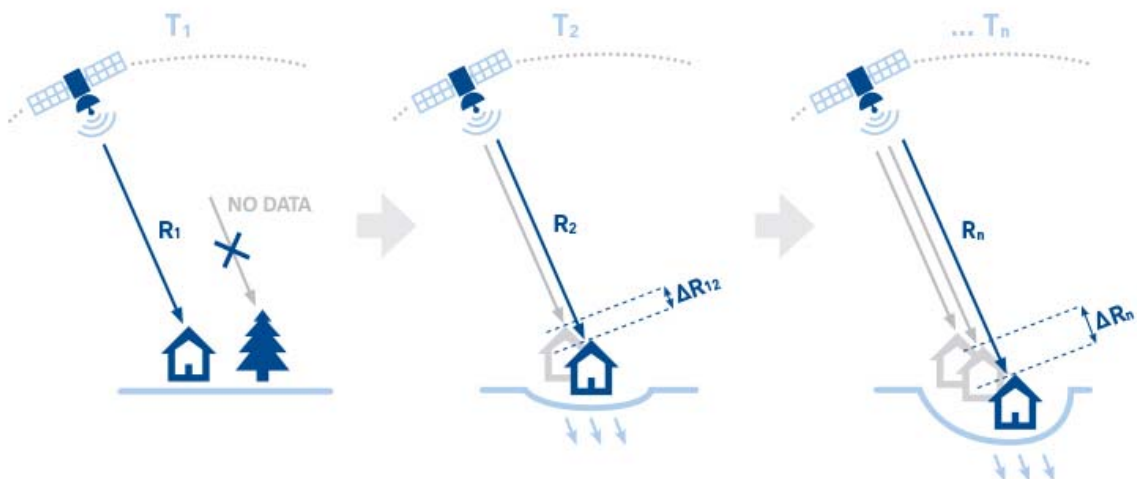
¹ Ing. Juraj Papčo, PhD., Ing. Matúš Bakoň, Katedra geodetických základov, Radlinského 11, 81368 Bratislava, +421-2-5927 4345, juraj.papco@stuba.sk, matus.bakon@stuba.sk, www.insar.sk

(<http://en.wikipedia.org/wiki/Envisat>) za obdobie rokov 2002 až 2010 pomocou softvérového balíka SARPROZ © (Perissin, D., 2014).

2 TECHNOLOGIA PSINSAR

Pri družicovej radarovej interferometrii sa využíva elektromagnetické žiarenie (EMŽ) s vlnovou dĺžkou v rozmedzí od 25cm do 3cm (frekvenčná oblasť pásiem L, S, C a X). Toto je vo forme pulzov vysielané aktívnym družicovým systémom smerom k Zemi a po interakcii so zemským povrchom následne prijaté naspať na družicu. Zo signálu sa využíva amplitúda a fáza prijatého elektromagnetického vlnenia. Obidve zložky sú zaznamenané vo forme komplexného čísla pre každý pixel družicovej snímky z daného územia (Hanssen, 2001). Pri interferometrickom spracovaní sa používa minimálne dvojica snímok, pričom sa primárne využíva fázová zložka. Ak chceme určiť deformácie zemského povrchu za určité obdobie, je nutné pracovať so snímkami ktoré sú vyhotovené z rovnakého miesta na obežnej dráhe družice ale v rôznych časových okamihoch. Princiipiálne ide o rozdiel signálu (fázovej zložky) z prvého a druhého (n-tého) preletu družice nad daným územím (Obr. 1) (Ferreti a kol., 2007). Rozdiel fáz sa následne opraví o účinok zakrivenia Zeme, topografie, vplyvu atmosféry, nepresnosti určenia dráhy družice a zobrazí sa na danom území vo forme interferenčných pásov. Takto získaný diferenčný interferogram je prvým ukazovateľom miery deformácie na danom území.





Obr. 1 Princíp družicovej radarovej interferometrie (Ferreti a kol., 2007 ; TRE, 2014)

Matematicky môžeme rozdiel fáz vyjadriť v súlade s (Soergel, 2010) vo forme:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi = W \left\{ \varphi_{fE} + \varphi_{TOPO} + \varphi_{DEFO} + \varphi_{Error} \right\} \approx \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (1)$$

$$\varphi_{Error} = \varphi_{Orbit} + \varphi_{Noise} + \varphi_{Atmo} + \varphi_{Decorrelation}$$

kde λ je vlnová dĺžka použitého EMŽ, Δr je hľadané posunutie (deformácia) v smere dráhy lúča (LOS z ang. Line of Sight), φ_1 φ_2 predstavujú fázu z prvej, resp. druhej snímky, φ_{fE} predstavuje účinok zakrivenia Zeme na zmenu fázy, φ_{TOPO} je zmena fázy spôsobená topografiou, φ_{DEFO} je zmena fázy spôsobená deformáciou zemského povrchu a φ_{Error} je vplyv rušivých faktorov (určenie dráhy družice, vplyv atmosféry, spracovania signálu, šumu, ...) na zmenu fázy.

Jednou z pokročilých metód radarovej družicovej interferometrie je metóda využívajúca v čase stabilné, permanentné, prirodzené alebo umelo vytvorené odrážače PSInSAR. Technológia je založená na identifikácii bodových miest na snímke (odrážačov), ktoré vykazujú vysokú stabilitu koherencie a fázy signálu počas celého obdobia sledovania územia. Ide hlavne o objekty vytvorené ľudskou činnosťou, napr. budovy, mosty, oporné múry, monumenty, veľké antény, stožiare, ktoré sa nachádzajú v záujmovej oblasti. Tieto body (odrážače) môžeme chápať ako „prirodzenú sieť bodov GNSS“, ktorá nám slúži na plošné sledovanie stability daného územia (Ferreti a kol., 2001; Kampes, 2006). Proces spracovania pozostáva z nasledujúcich základných krokov:

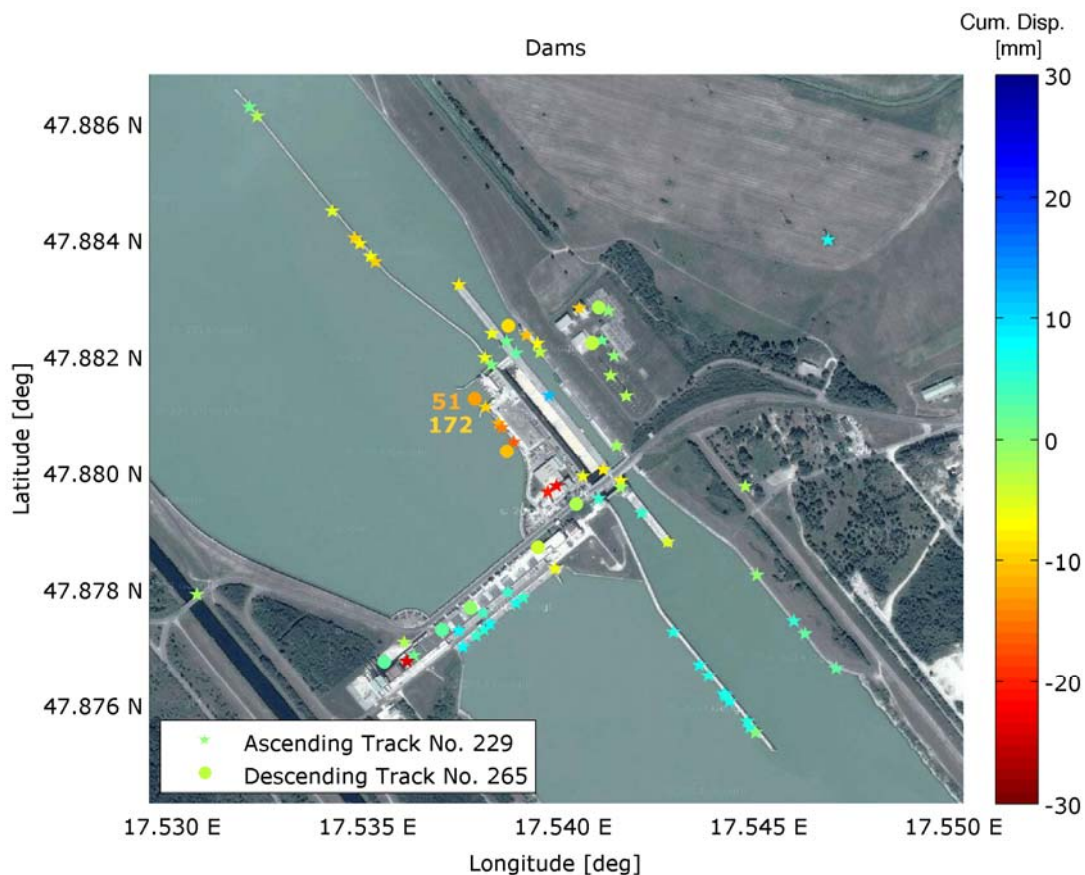
1. výpočet diferenčných interferogramov medzi primárnou snímku (master image) a ostatnými, sekundárnymi snímkami (slave images)
2. predbežná („hrubá“) identifikácia potenciálne vhodných kandidátov na trvalé odrážače
3. čiastočná eliminácia vplyvu systematických efektov (napr. atmosféry)
4. finálna („jemná“) identifikácia trvalých odrážačov

5. odhad časových zmien v polohe (v smere LOS) pre každý identifikovaný odrážač.

Hlavnou výhodou metódy PSInSAR v porovnaní s klasickými geodetickými technikami je možnosť monitorovať stabilitu na veľkom území s vysokou presnosťou (teoreticky až do 0.5 mm/rok, v závislosti od použitej vlnovej dĺžky systému). Nevýhodou je hlavne nutnosť použitia väčších sád snímok (min. 20), určenie deformácie primárne len v smere dráhy lúča a nižšia citlivosť technológie na veľmi rýchle (náhle) a veľké zmeny.

3 PRAKTICKÝ EXPERIMENT V OBLASTI VD GABČÍKOVO

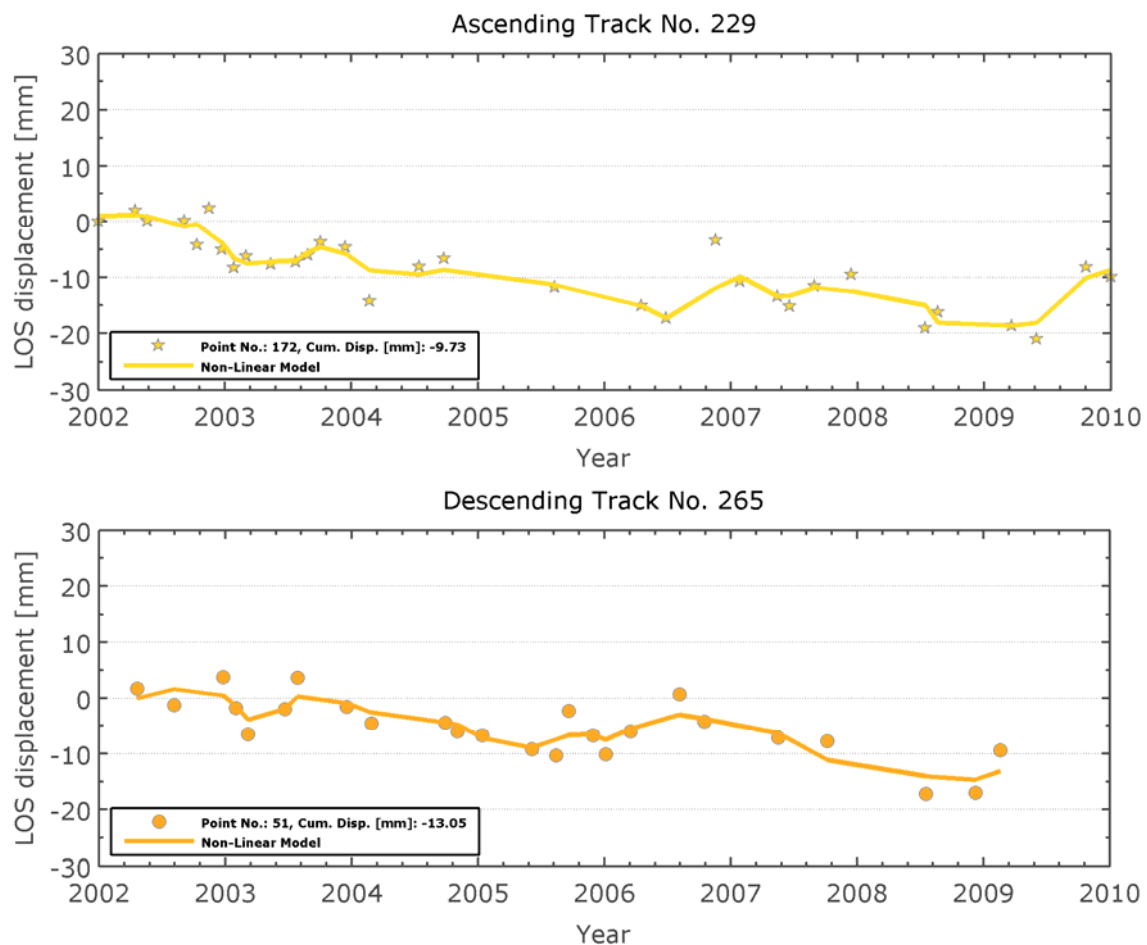
Hlavným cieľom tejto analýzy bolo vôbec prvé posúdenie vhodnosti použitia technológie družicovej radarovej interferometrie pri monitorovaní stability vodného diela na území Slovenska. Ako hlavný objekt našej štúdie sme si vybrali VD Gabčíkovo (stupeň Gabčíkovo), vzhľadom na jeho veľký význam, vhodnú polohu, veľkosť a dostupnosť družicových radarových snímok pre danú oblasť. Snímky boli poskytnuté v rámci projektu na získanie údajov ESA „Earth Observation Principal Investigator Project EOPI-9981: Detection of ground deformation using radar interferometry techniques“, ktorý je zameraný na výskum stability územia Bratislavy a jej širšieho okolia. Konkrétne išlo o 57 snímok z družice ENVISAT, pričom 32 z nich bolo zo vzostupnej dráhy (ascending track) č. 229 a 25 bolo zo zostupnej dráhy (descending track) č. 265. Tieto snímky pokrývali časové obdobie rokov 2002 až 2010. Z celej snímky (60x60 km) bolo vybrané záujmové územie o veľkosti 1x1 km, ktoré pokrývalo primárne oblasť vodného diela.



Obr. 2 Mapa posunov (celkového kumulovaného posunutia) v oblasti VD Gabčíkovo (hviezdička – body určené zo vzostupnej dráhy, guľička – body určené zo zostupnej dráhy)

Spracovanie bolo vykonané v softvérovom balíku SARPROZ © (Perissin, 2014) metódou využívajúcou nelineárne modelovanie pohybu identifikovaných trvalých odrážačov. Táto metóda je vhodná práve pri štúdiu menších oblasti, kde sa predpokladá rôzny charakter pohybu, náhle skoky v posunoch, resp. väčší účinok sezónnych vplyvov (napr. teploty, vlhkosti, kolísania vodnej hladiny) . Výsledkom takéhoto spôsobu spracovania je mapa celkového kumulovaného posunutia bodov (trvalých odrážačov) v danej oblasti za predmetné obdobie rokov 2002 až 2010 (Obr 2.).

Každý analyzovaný bod predstavuje časový rad, ktorý reprezentuje vývoj posunutia (deformácie) daného bodu v danom časovom úseku. Pre ilustráciu uvádzame dva body, ktoré sa nachádzajú v blízkosti vtokového objektu plavebných komôr (Obr. 3). Charakter ich správania sa v čase je veľmi podobný, hoci merania na vzostupnej a zostupnej dráhe sú vzájomne nezávislé.



Obr. 3. Časový vývoj posunutia bodu č. 172 (vzostupná dráha) a č. 51 (zostupná dráha)

Vzhľadom na použité údaje, ich presnosť, priestorové a časové rozlíšenie, spôsob spracovania môžeme konštatovať že celková presnosť určenia posunutia pomocou technológie PSInSAR sa pohybuje v rozmedzí 3 až 5 mm. Z analýzy výsledkov môžeme konštatovať, že oblasť VD Gabčíkovo je celkovo stabilná. Väčšie posuny sa vyskytujú v oblasti plavebných komôr, čo veľmi dobre korešponduje aj s očakávaným dynamickým správaním sa tejto časti VD. V analyzovanej oblasti sa tiež vyskytuje niekoľko bodov s výraznými (kladnými aj zápornými) posunmi, ktorých pôvod je otázny a bolo by vhodné ich

overiť, resp. porovnať s výsledkami dlhodobého monitoringu pomocou iných geodetických metód.

4 ZÁVER

Technológia družicovej radarovej interferometrie s využitím trvalých odrážačov má nezastupiteľné miesto medzi metódami monitorovania zmien zemského povrchu. Príspevok prináša prvé výsledky z nasadenia tejto metódy pri určovaní posunov v oblasti VD Gabčíkovo. Z analýzy môžeme konštatovať, že predmetné územie je relatívne stabilné a dosiahnuté výsledky potvrdili vhodnosť použitia tejto technológie pri monitorovaní stability ľudskou činnosťou vytvorených veľkých objektov. Zlepšenie výsledkov by mohlo poskytnúť použitie údajov (snímok) s menšou vlnovou dĺžkou (pásmo X), resp. vyšším priestorovým a časovým rozlíšením, napr. použitím údajov z družice TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed, Sentinel-1A/1B. Keďže ide o vôbec prvé predbežné výsledky, bolo by veľmi vhodné ich porovnanie a vzájomné overenie s výsledkami iných geodetických a geotechnických metód sledovania stability objektov VD Gabčíkovo.

POĎAKOVANIE

Tento príspevok vznikol pri riešení projektu 1/0642/13 finančne podporeného Vedeckou grantovou agentúrou MŠVVaŠ SR a SAV VEGA.

Autori ďakujú Agentúre Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR pre štrukturálne fondy EÚ a Slovenskej technickej univerzite v Bratislave za finančnú podporu Projektu ITMS 26220220108.

LITERATÚRA

- [1] FERRETI, A. - PRATI, C. - ROCCA, F. 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry.
- [2] IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1), s 8–20.
- [3] FERRETI, A. - MONTI-GUARNIERI, A. - PRATI, C. - ROCCA, F. - MASSONET, D. 2007. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation.
- [4] ESA Publications.
- [5] HANSEN, R. 2001. Radar interferometry: Data interpretation and error analysis. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- [6] KAMPES, B. M. 2006. Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique. Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- [7] PERISSIN, D. 2014. SARproZ software. Official Product Web Page.: https://engineering.purdue.edu/~perissin/index_files/download.htm.

- [8] SOERGEL, U. 2010. Radar Remote Sensing of Urban Areas. Springer, Science+Business Media B.V.
- [9] TELE-RILEVAMENTO EUROPA, TRE (2014). Oficiálna www stránka: <http://www.treuropa.com>.