

# A topográfia-dinamika nagyléptékű leképezése: hazai Sentinel-1 radarinterferometriai eredmények

Szűcs E, Bozsó I, Bányai L, Szárnya Cs, Wesztergom V

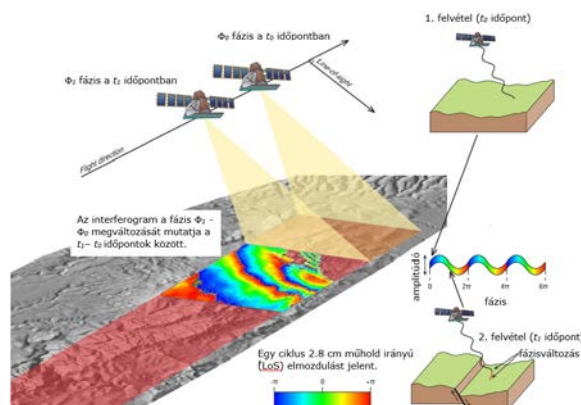
MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet

*A bolygó belső folyamatainak legszembetűnőbb és közvetlenül tapasztalható megnyilvánulása a topográfia-dinamika. Az ESA Sentinel-1 földmegfigyelő programja egyedülálló lehetőséget ad a felszíni folyamatok nagy pontosságú, finom felbontású leképezésére mindezt nagy időbeli felbontással párosítva. A nagy időállandójú tektonikai folyamatok, infrastruktúra deformációk néhány mm/év nagyságrendű sebességgel jellemezhetők, ezek detektálására a módszer alkalmas, a korlátot a hullámterjedés okozta jelkésletetés kvantitatív ismeretének hiánya jelenti, ami kiemelt jelentőséggel bír regionális léptékű folyamatok vizsgálatában.*

## Bevezetés

Az elmúlt évtizedekben az űrgeodéziai eszközök és módszerek fejlődése a bolygófelszín dinamikai folyamatainak, a topográfia-dinamikának korábbinál jóval pontosabb megfigyelését teszi lehetővé. Napjainkban a földmegfigyelés egyik legfontosabb eszközévé az ESA Copernicus programjának Sentinel-1 űrmissziója vált, amely a felszín deformációkat nagy területre, páratlan időbeli és térbeli felbontással a következő két évtizedben szolgáltatni fogja.

A műholdradar interferometria (InSAR) a felszín mikrohullámú ( $f = 5.6$  GHz) felvételeinek két időpont közötti fázisváltozását használja fel a bekövetkezett deformációk meghatározására (1. ábra). Az interferometrikus fázis nemcsak a felvételek időpontja között esetlegesen bekövetkezett deformáció okozta fázisváltozást tartalmazza, hanem a közeg, azaz döntően a troposzféra és az ionoszféra, hullámterjedési tulajdonságainak megváltozásából származó jelkésletetést, az alkalmazott domborzatmodell hibáinak hatását valamint egyéb zajforrásokat.



1. ábra. A differenciális műholdradar interferometria elve

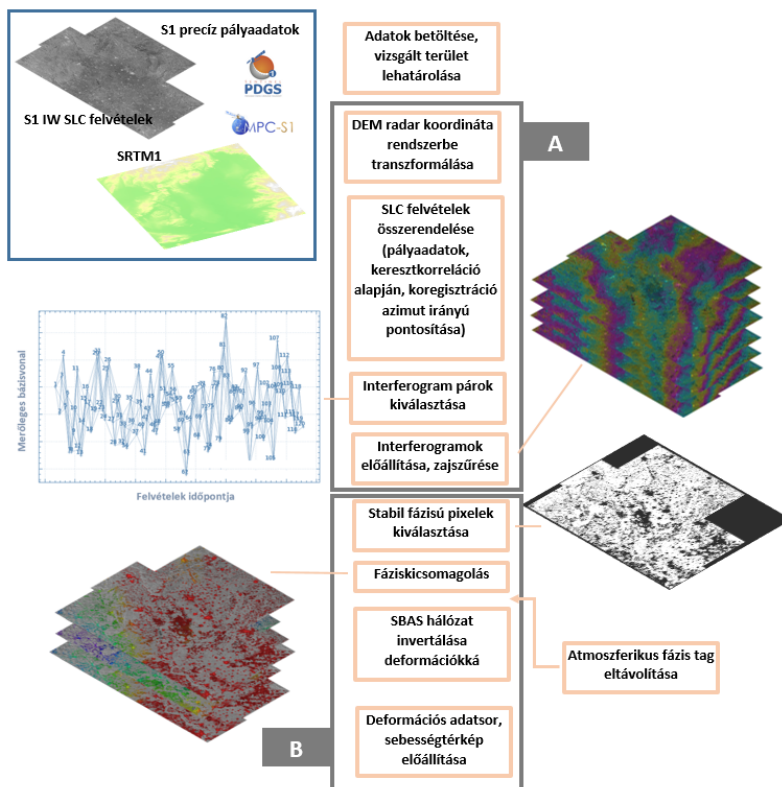
## Automatizált Sentinel-1 feldolgozó eljárás

A Sentinel-1 műholdpár korábban nem látott lehetőséget ad a felszíni folyamatok dinamikájának megfigyelésében, ugyanakkor az adatmennyiség (1 felvétel ~ 5-8Gb, 1 felvétel 250 km x 270 km területet fed le, a műholdpár visszatérései ideje 6 nap) igazi kihívást jelent mind az adattárolás, mind a feldolgozás szempontjából. A Sentinel-1 adatokban rejlő potenciált és lehetőségeket

felismerve számos nemzetközi kutatócsoport kezdte el a felvételek szisztematikus feldolgozását akár kiemelt földtani-földfizikai kockázatokkal érintett területeken (JPL ARIA – NASA JPL’s Advanced Rapid Imaging and Analysis center for natural hazards, SARVIEWS – SAR-based hazard information, DLR ZKI – DLR Center for satellite based crisis information) vagy regionális léptékben (COMET InSAR, insar.no, Manunta *et al.*, 2019).

Hazai viszonylatban még nem készült átfogó elemzés Sentinel-1 adatokra támaszkodva, vizsgálataink elsősorban a feldolgozási lánc összeállítására koncentráltak, melyet teszt jelleggel alkalmaztunk a keleti országrészt lefedő S1A felvételekre (relatív pályaszám /track 102).

A Sentinel-1 felvételek szabadon hozzáférhetőek akár közvetlenül az ESA (Copernicus Open Access Hub), akár tükrözéssel előállított nemzeti, regionális adatközpontokból (Australia/Austria/Belgium/Greece/France/Germany/Italy Sentinel National Mirror, Alaska Satellite Facility), a felvételi módok közül az IWS (interferometric wide swath) alkalmas a felszíni deformációk regionális léptékű meghatározására. A feldolgozás során a felvételek összerendelése (coregistration), a digitális domborzatmodell radar koordináta rendszerbe történő transzformációja során precíz Sentinel-1 pályaadatokat használtunk fel (<https://qc.sentinel1.eo.esa.int/>, Sentinel-1 Quality Control). Ez kiemelten fontos regionális léptékű feldolgozások során, ahol a vizsgált területet lefedő adatok több felvételt haladási irányú mozaikolásával állítható elő. A fenti adatok letöltése azok látenciáját figyelembe véve automatizálható. A feldolgozás során az SRTM1, 1” (megközelítőleg 30 m a meridián mentén) felbontású digitális felszínmodell (DEM) alkalmaztuk. A feldolgozási lánc lépéseit a 2. ábra foglalja össze. Az „A” jelű feldolgozási lépések végrehajtása, azaz a fókuszált SAR felvételekből (SLC) interferogramok előállítása, viszonylag rutinszerű eljárásnak tekinthető melyet számos nyílt forráskódú és kereskedelmi szoftver (ISCE, GMTSAR, S1TBX, GAMMA) támogat.



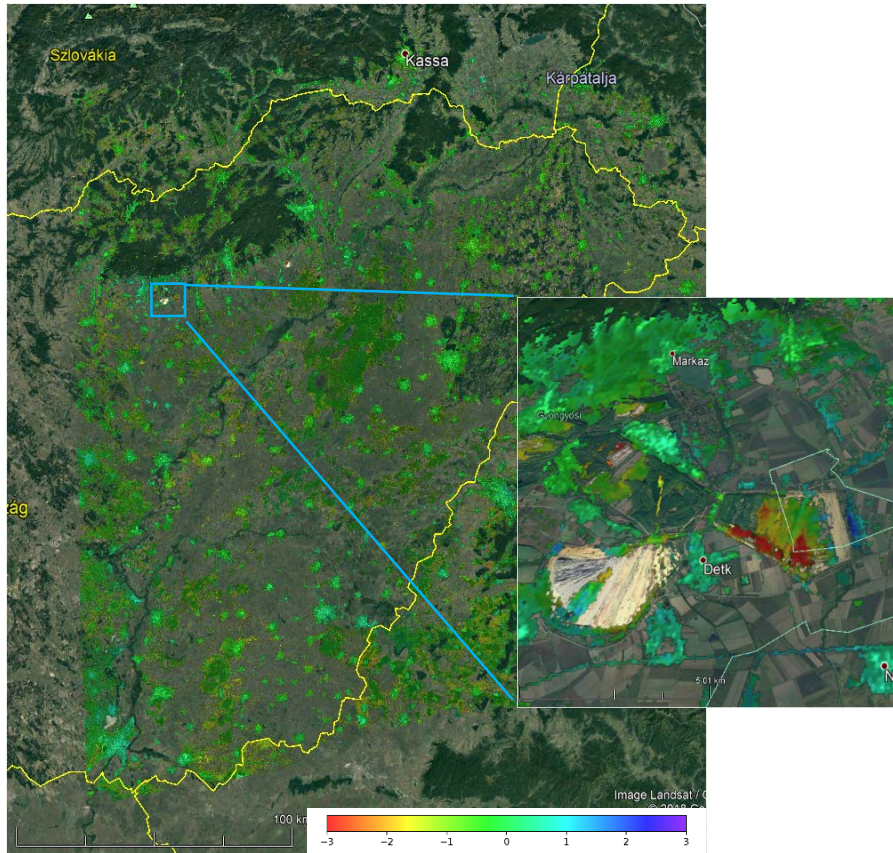
2. ábra. Sentinel-1 felszín deformációk előállításának lépései

A feldolgozás egyes lépésekről részletes összefoglalót ad például Simons and Rosen, 2007; vagy Ferretti, 2014. Megjegyezzük, hogy a Sentinel-1 felvételek feldolgozása során a legkörültekintőbb lépést a felvétel csíkok (burst) mozaikolása jelenti. A Sentinel-1 által alkalmazott TOPS leképezési eljárás, amely viszonylag nagy sáv térképezését biztosítja más missziókkal összehasonlítva, ezt az antenna haladási irányra merőleges valamint haladási irányú ciklikus forgatásával éri el. Ennek eredményeként az SLC felvétel átlagosan  $3 \times 10$  burst-ból áll össze, melyeket haladási irányban legalább  $1/1000$  pixel pontossággal kell illeszteni a nem kívánt fázisugrások elkerüléséhez. Az erre szolgáló ESD eljárás (Fattahi, Agram and Simons, 2017) a burst-ök átfedő részein képzett kettős interferogram különbségek alapján határozzák meg az eltolás mértékét.

Az interferogramok előállítását általában nem minden adatpont kerül feldolgozásra, hanem csak azok, melyek fázisváltozását hosszú időn keresztül a deformációs dominálja és nem pedig a fáziszaj. Különböző eljárások állnak rendelkezésre ezen pontok meghatározására, amelyről összefoglalót ad (Crosetto *et al.*, 2016) munkája. A módszerek összetettsége az egyszerű koherencia küszöbérték megválasztástól a szabadalom alatt álló eljárásokig terjed. A különböző módszerek jelentik az alapját az interferogramok idősor elemzését támogató (MT InSAR, 2. ábra B panel) nyílt forráskódú és kereskedelmi szoftvereknek (PyRate, PySAR, GiANT, StaMPS, SARscape, SARPROZ, GAMMA IPTA).

Az összeállított feldolgozási láncot egy közel 4 évet felölelő S1A adatsor alapján vizsgáltuk (2015-03-05 és 201-04-13 közötti időszak). A Sentinel-1 műholdpár ún. small-baseline misszió, ami egyrészt arra utal, hogy megközelítőleg ugyanabból a pozícióból készülnek különböző időpontban a felvételek (a bázisvonal műhold ránézési irányára merőleges műholdpozíciók közötti távolság, értéke néhány 10 m). Másrészt small-baseline-nak tekinthető abból a szempontból is, hogy a TOPS felvételi mód következtében jó minőségű interferogramokra van szükség a felvételek azimut irányú mozaikolásához, amit rövid időkülönbségű felvételek kiválasztását feltételezi. Az ún. SBAS (Small Baseline Subset, Berardino *et al.*, 2002) módszer pontosan ilyen rövid térbeli és időben közeli felvételek alapján kialakított interferogram hálózat alapján becsüli a felszín deformációkat. Tanulmányunkban több mint 120 felvétel alapján közel 470 12, 24 és 36 napos interferogramból álló hálózat hoztunk létre. Az adatok kezelhetősége érdekében az interferogramokat azimut irányban 5, arra merőlegesen 20 cellánként átlagoltuk, így közel  $70 \times 70$  m<sup>2</sup> egy-egy felbontási cella. A stabil fázisú cellákat az elemzéshez az SBAS hálózatban az egy „háromszöget” alkotó,  $t_1$ ,  $t_2$  és  $t_3$  időponthoz tartozó interferogramokból számított  $W[(\varphi_{12} - \varphi_{11}) + (\varphi_{13} - \varphi_{11}) + (\varphi_{23} - \varphi_{13})] = \varphi_{res}$  nem nulla maradék fázis alapján határoztuk meg,  $W$  a  $2\pi$ -vel való maradékos osztást jelöli. Az elmozdulás idősorok és az azokból származtatott deformációs sebességek a kicsomagolt interferogramok hálózatának legkisebb négyzetes értelmű invertálásával állítható elő. Az interferogram hálózat redundanciája csökkenti a bázisvonal, a terepmodell, a dekorreláció okozta fázishibákat viszont a jelterjedésből származó atmoszférikus fázis tag hatását nem, mivel az közvetlenül jelenik meg az interferometrikus fázisban. A deformációs és az atmoszférikus fázis tag szétválasztása a két mennyiség térbeli és időbeli karakterisztikáját figyelembe szűrésekkel lehetséges. Vizsgálatainkban mi is ezt az utat választottuk, viszont ezzel kapcsolatban fontos megjegyezni, hogy így minden nagy skálájú (hosszú hullámhosszú) felszínváltozás is eltávolításra került a végleges deformációs sebességtérképből (3. ábra). Az atmoszférikus fázis külső, független forrásból történő meghatározása ezen nagymértékben javítani fog. Ilyen fejlesztés alatt álló kezdeményezés a GACOS (Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR, (Yu *et al.*, 2018)), amely a közepes felbontású ECMWF időjárás előrejelző modellt kombinálja nagy felbontású felszínmodellekkel, és távlati tervei között szerepel a Nevada Geodetic Laboratory globális GPS hálózatából származó troposzférikus késleltetés adatok integrációja, amellyel a meghatározott fáziskésleltetések mind térbeli mind időbeli felbontása jelentősen meg fog növekedni.

## Összefoglalás



3. ábra Műhold irányú átlagos deformációs sebesség térkép (cm/év)

Tanulmányunkban kísérleti jelleggel regionális léptékben közel 4 év Sentinel-1A felvételt dolgoztuk fel. A jelkésleltetés okozta fázislag kiküszöbölésére alkalmazott eljárás következtében elsősorban a vizsgált terület lokális deformációi figyelhetők meg, mint a 3. ábra kivágatában jelölt Mátrai Erőmű Zrt. visontai külszíni bányáinak tevékenysége. A kidolgozott eljárás továbbfejlesztéséhez, a Sentinel-1 földmegfigyelési adatok jövőbeni nagy léptékű felhasználásához elengedhetetlen lesz az atmoszféra hatásának külső adatbázisokon alapuló adekvát modellezése.

A tanulmány a 2018-1.2.1-NKP-2018-00007 pályázat támogatásával készült.

### Irodalom

- Berardino, P. *et al.* (2002) 'A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms', *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), pp. 2375–2383.
- Crosetto, M. *et al.* (2016) 'Persistent Scatterer Interferometry: A review', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Inc. (ISPRS), 115, pp. 78–89.
- Fattahi, H., Agram, P. and Simons, M. (2017) 'A Network-Based Enhanced Spectral Diversity Approach for TOPS Time-Series Analysis', *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(2), pp. 777–786.
- Ferretti, A. (2014) *Satellite InSAR Data*. EAGE Publications BV.
- Manunta, M. *et al.* (2019) 'The Parallel SBAS Approach for Sentinel-1 Interferometric Wide Swath Deformation Time-Series Generation: Algorithm Description and Products Quality Assessment', *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. IEEE, PP, pp. 1–23.
- Simons, M. and Rosen, P. A. (2007) 'Interferometric Synthetic Aperture Radar Geodesy', in *Treatise on Geophysics*. Elsevier B.V., pp. 391–446.
- Yu, C. *et al.* (2018) 'Generic Atmospheric Correction Model for Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations', *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. Wiley-Blackwell. doi: 10.1029/2017JB015305.