

AZ INSAR TECHNOLÓGIA ALAPJAI ÉS A REFLEKTÁLÓ FELÜLETEK JELLEMZŐI

Bányai László*, Szűcs Eszter*, Kalmár János*, Eperné Pápai Ildikó*, Bán Dóra*



The basics of InSAR technology and the characteristics of scattering surfaces – This paper summarises the most important characteristics of the satellite radar interferometry, which is based on the parameters of ERS-1/2 and ENVISAT satellites of ESA. The most important geometric equations and the basic steps of data processing are summarised. Using the error propagation the precision of geometric corrections is estimated. The characteristics of scattering surfaces are presented in four main categories. The future plans of our institute are outlined, which is based on Sentinel-1A satellite of ESA and artificial reflectors.

Keywords: SAR, InSAR, D-InSAR, PSI, scattering surfaces

Ebben a cikkben röviden összefoglaljuk a műholdas radarinterferometria fontosabb jellemzőit, amit az ESA ERS-1/2 és ENVISAT műholdjainak fontosabb paramétereinek alapján mutattunk be. Összegezzük a radar interferometria fontosabb geometriai összefüggéseit és az adatfeldolgozás fontosabb lépéseit. A hibaterjedés alkalmazásával levezetjük a geometriai korrekciók pontosságát. A reflektáló felületek tulajdonságait négy jellegzetes kategóriában tárgyaljuk. Felvázoljuk intézetünk jövőbeli terveit, ami az ESA Sentinel-1A műhold SAR adatainak és mesterséges reflektorok alkalmazásán alapul.

Kulcsszavak: SAR, InSAR, D-InSAR, PSI, reflektáló felületek

1 Bevezetés

A magyar köznyelvben is általánosan használt elnevezés az angol „Radio Detection And Ranging – RADAR” betűszóából származik, amely magyarul rádióérzékelést és távmérést jelent. A technológia a mozgó objektumok katonai érzékelésétől, a radar képek (felvételek) készítésén át, a földfelszín geometriai változásainak interferometrikus módszerrel történő megfigyeléséig jelentős és folyamatos fejlődésen ment keresztül, ami még napjainkban is tart.

A radar felvételek pl. a mezőgazdasági távérzékelésben (Davidson et al. 2000, Martinez et al. 2000), a topográfiai modellek elkészítésében (Farr et al. 2007), a földfelszín geomorfológiai és tektonikai változásainak, továbbá a mesterséges objektumok mozgásának megfigyelésében is jelentős szerepet játszanak (Hooper et al. 2004, 2012, Cuenca et al. 2013, Grenerczy és Wegmüller 2011, 2013, Petrik 2007).

Röviden ismertetjük a műholdakon elhelyezett szintetikus apertúrájú (rés) radar (Synthetic Aperture Radar – SAR) technológia jellemzőit, és bemutatjuk az interferometrikus alkalmazás (InSAR) alapösszefüggéseit, különös tekintettel a szórópontok (reflektáló felületek) szerepére (Ferretti et al. 2007; Sandwell et al. 2011). A cikk végén az intézetünkben tervezett alkalmazásokat is összefoglaljuk.

2 A műholdas SAR technológia fontosabb jellemzői

A technológiát az ESA (Európai Űrügynökség) ERS-1, ERS-2 és ENVISAT műholdjainak jellemző paramétereinek alapján mutatjuk be. Jelenleg ezek a műholdak már nem üzemelnek, de archív adataik nagy értéket képviselnek. A 2014. április 3-án pályára állított Sentinel-1A SAR műhold (http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Security_services,2014-12-27) hasonló paraméterekkel rendelkezik.

A műholdak egy 10 m x 1 m nagyságú antennát hordoznak, amelyek a haladás irányához viszonyítva keletre néznek, és a nadírhoz viszonyítva 20-23 fok alatt (ferdén) világítják meg a földfel-

színt. A holdak közel poláris, napszinkron pályán keringenek, a pályák inklinációja 98 fok körüli, azaz az Egyenlítőn a felszálló ágban lévő műhold antennája 44 fok, majd a leszálló ágban 316 fok azimutban (ellenkező oldalról) világítja meg a földfelszínt. Ezek az értékek a földrajzi szélességgel változnak. A műholdak földfelszín feletti magassága 800 km körüli érték (a Sentinel-1 esetében 693 km). Egy nagyobb terület interferometrikus feldolgozására alkalmas felvételek visszatérési ideje 35 nap. A vizsgálatoknál le- és felszálló irányú felvételek is felhasználhatók. (A Sentinel-1A esetében a tervezett visszatérési idő 12 nap, a vizsgált területre vonatkozó fel- és leszálló megfigyelések között 6 nap telik el.)

Az antenna által egy adott pillanatban megvilágított közel ellipszis alakú terület 100 km és 5 km átmérővel jellemezhető (1. ábra). Az egyszeri megvilágítás azonban gyenge visszaverődést eredményez. Ha azonban a műhold mozgása során a visszaverődő jeleket folyamatosan integrálják (Fraunhofer diffrakció), a 10 m hosszú antenna gyakorlatilag többszörözhető, ezért nevezik szintetikus apertúrájú radarnak, ami jelentősen megnöveli a visszavert jel intenzitását (2. ábra). Ez az eljárás teszi lehetővé a visszavert, szétszóródott jelek szintézise alapján a felvétel fókuszálását, ami azimut irányban 5 m-es felbontást eredményez.

A visszavert jelek azimutra merőleges (távolság irányú) felbontását a vivő frekvenciákra ültetett lineáris felfutású frekvencia modulációk, a „chirp” (ciripelő) jelek teszik lehetővé, amelyek futási idejük alatt szintén 5 km-es távolságot fednek le (100 km során 20 ilyen jelsorozatot kell generálni). A jelek futási idejének és doppler frekvenciájának meghatározásával a műhold haladási irányára merőleges ferde távolságokban közel 10 m-es felbontás érhető el, amit tömörítésnek neveznek.

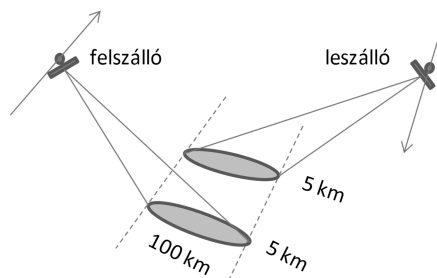
A visszavert jelek térbeli (és egyúttal időbeli) felbontása részben már a műhold számítógépén megtörténik. A fókuszálás és tömörítés eredménye egy ferde síkban értelmezhető szabályos sorokból és oszlopokból álló pixel (vagy felbontási cella) hálózat. Minden egyes pixel egy komplex számot tartalmaz:

$$z = y e^{i\phi} = y \cos \phi + i (y \sin \phi), \quad (1)$$

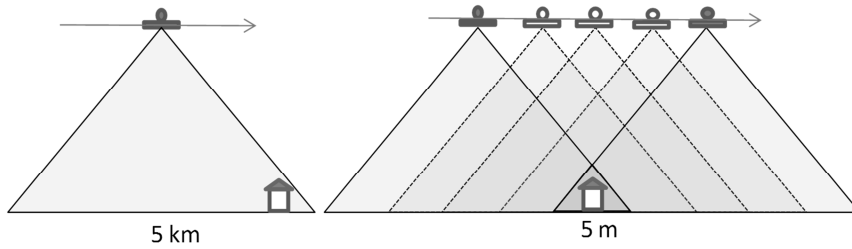
ahol y a megvilágított felületdarabról visszavert (szuperponálódott) jel amplitúdója (y^2 az intenzitása) és ϕ a fázisszöge. A fázisszög az oda-vissza megtett kétszeres út egy hullámhossznál kisebb maradékának felel meg. A radar képek esetében az intenzitás, az interferometrikus feldolgozásnál a fázisszög a felhasználandó mennyiség. Az így előállított 100x100 km négyzetes felvételt egyszerű komplex képnek („Single Look Complex” – SLC) nevezik. (A Sentinel-1A esetében 250 km x 250 km az interferometrikus alkalmazás képmérete, de a felbontása csak 5 m x 20 m.) Az InSAR szoftverek általában a nyers adatok előfeldolgozásával állítják elő az SLC képeket, de ezek közvetlenül a szolgáltatóktól is beszerezhetők.

Az adatok további feldolgozása a műholdpályák pontos ismeretét is megkívánja ($3\sigma \cong 1$ m). Annak ellenére, hogy a ferde síkban értelmezhető felbontási cellák műholdhoz viszonyított távolságait csak néhány méter pontosan ismerjük, megfelelő erősségű jelek esetében a mért fázisszög pontossága a hullámhossz 10^{-4} -szerese is lehet, amit azonban számos hibaforrás is befolyásolhat.

A SLC képek geometriai értelmezését a 3. ábrán mutatjuk be. Az ERS holdaknál a pixelek ferde távolságú mérete 8 m és az azimut irányú 4 m, ami a földgömbület és a topográfia következtében az ellipszoid felületén szabálytalanul változhat.



1. ábra. A felszálló és leszálló irányú műhold átvonulás egy időpillanatban besugárzott területe a megfigyelési sávban

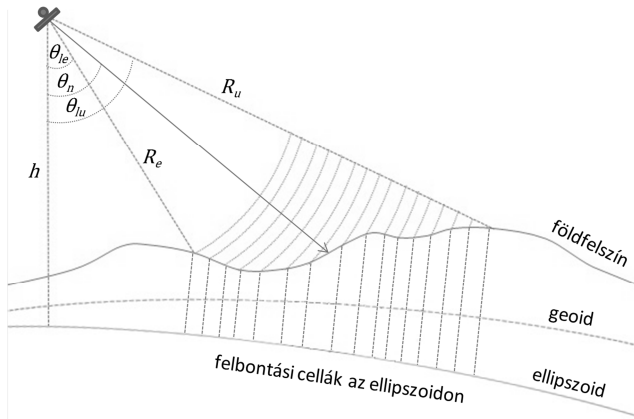


2. ábra. A szintetikus apertúra radar elve: a haladás mentén folyamatosan integrált jel megnöveli a felbontást

Egyszerű sík alapfelületet feltételezve a földfelszíni felbontás megközelítőleg 4 m x 20 m, ami a beesési szöggel kismértékben folyamatosan változik. A radar koordináta-rendszerben értelmezett pixelek ellipszoidi, majd vetületi elhelyezését georeferálásnak nevezik.

A beérkezett jelek intenzitása, közvetve a fázisa is, számos tényezőtől függ. Ilyen a megvilágított felület anyaga, érdessége és dielektromos állandója, amit a felület nedvessége és növényzeti borítottsága is jelentősen befolyásol. Geometriai értelemben (hasonlóan a fényképekhez) előfordulhatnak radar árnyékban, takarásban lévő területek. Meredek lejtőkről nagy mennyiségű jelek szuperponálódhatnak a ferde cellákba, amit elő-rövidülésnek (foreshortening) neveznek. Hegyvidéki és nagyvárosi körülmények között előfordulhat, hogy a műholdhoz viszonyítva azonos távolságú, de egymástól távoli felületekről összegződnek a jelek, amit takarásnak (lay-over) neveznek. Az utóbb két eset nagyon kedvezőtlennek számít, annak ellenére, hogy a pixel intenzitása ugyan nagyon-nagyon lesz, de a pixel geometriai felbontása nagyon bizonytalaná válik.

Az intenzitás a vivő jel frekvenciájától is függ, néhány műhold jellemzőit az 1. táblázatban foglaltuk össze. Minél nagyobb a vivő frekvencia, annál nagyobb a visszaverődés intenzitása és a fázis felbontása is, de a növényzet különböző felületeiről történő többes visszaverődés is nagyobb lehet. Ezért például az erdős területeken a fatérfogat becslésére az X, a topográfia meghatározására a nagyobb behatolású, de pontatlanabb L tartomány lehet a kedvező választás.



3. ábra. A SAR felvételek geometriája: a ferde irányú szabályos pixeleket az antenna nadír iránya mentén értelmezhetjük. Az azimut irány a képsíkra merőleges. θ_{le} és R_e az első, a θ_{lu} és R_u az utolsó visszaverődésre vonatkozó látószögek és távolságok, θ_n az antenna nadír iránya és h a műhold ellipszoid feletti magassága

1. táblázat. Néhány SAR műholdfrekvencia jellemzői

Műhold	sáv-tartomány	frekvencia [GHz]	hullámhossz [cm]
ALOS	L	1.2	23.6
ERS 1-2, ENVISAT (Sentinel-1A)	C	5.3	5.66
TerraSAR-X	X	10	3.11

3 Az interferometrikus feldolgozás alapösszefüggései

Ellentétben az amplitúdó értékekkel, amelyeket szürke árnyalatos SAR képként is felhasználhatunk, a fázisértékek látszólag véletlenszerű változásokat mutatnak. Ha egy területet azonos irányból kétszer egymás után megvilágítunk, a műholdpályák néhány száz méteres eltérést is mutathatnak, ezért a pixel sorozatok teljes mértékben nem esnek egybe. Ha az egyik megvilágítást „mester”, a másikat „szolga” felvételnek tekintjük, az utóbbit úgy kell átalakítani, hogy az a mester felvétel pixeleinek feleljen meg. Ezt az eljárást megfeleltetésnek („co-registration”) nevezik, amit általában affin transzformáció segítségével hajtanak végre. A pixelek transzformációja miatt a fázis értékeket is korrigálni kell, amit újra-mintavételezésnek („resampling”) neveznek.

Ha a mester és szolga felvételek közötti korreláció, tulajdonképpen a koherencia, a szükséges mértékben megmarad, ami a terepi adottságoktól is nagymértékben függ, ún. interferogramokat állíthatunk elő, amelynek a pixel értékeit úgy kapjuk meg, hogy a mester pixelek komplex számait megszorozzuk az azonos szolga pixelek komplex konjugáltjával:

$$\begin{aligned} z_m &= y_m e^{i\phi_m}, \\ z_s^* &= y_s e^{-i\phi_s}, \\ z &= y_m y_s e^{i(\phi_m - \phi_s)}, \end{aligned} \quad (2)$$

ahol az m index a mester, az s index a szolga felvételt és $*$ a konjugáltat jelöli. Az interferogram már értelmezhető információt, a két felvétel közötti fáziskülönbséget, a diffrakciós csíkokat mutatja (4. ábra). Ha a két felvétel időpontja között a külső körülményekben semmilyen változás nem történt volna, a diffrakciós csíkok csak a műhold két helyzete közötti különbséget mutatnák, ahol az egész hullámhosszak számáról továbbra sem rendelkezünk információkkal.

Ha azonban két szomszédos interferometrikus cella közötti fáziskülönbséget is kiszámítjuk, ez már nagy valószínűséggel feltevésmentesen tükrözi a két felbontási cella közötti geometriai eltéréseket. Ha a különbségképzést az egész cellasorozatra elvégezzük, az egész hullámhosszak átlépésekor fázisugrást tapasztalhatunk (ezért ismétlődnek a csíkok az 4. ábra jobboldalán), aminek a meghatározását fáziskicsomagolásnak (phase unwrapping) nevezik. (A GPS technikánál ez a fázis-többértelműség feloldása, a SAR esetében ezt a sorok és oszlopok között síkban célszerű elvégezni.)

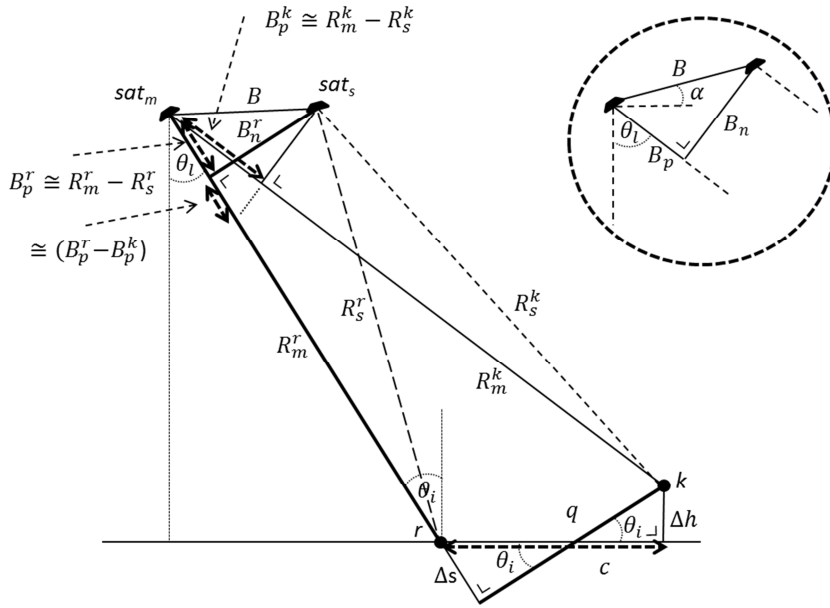
Az interferometrikus összefüggéseket vízszintes referencia sík és pixelek helyett pontokat feltételezve, az 5. ábrán mutatjuk be. A mérhető fázisszögek radiánban a

$$\begin{aligned} \phi_m^r &= 2\pi \left\{ \frac{2R_m^r}{\lambda} \right\}, & \phi_s^r &= 2\pi \left\{ \frac{2R_s^r}{\lambda} \right\}, & \phi^r &= \phi_m^r - \phi_s^r, \\ \phi_m^k &= 2\pi \left\{ \frac{2R_m^k}{\lambda} \right\}, & \phi_s^k &= 2\pi \left\{ \frac{2R_s^k}{\lambda} \right\}, & \phi^k &= \phi_m^k - \phi_s^k, \\ \Delta\phi^{rk} &= \phi^r - \phi^k \end{aligned} \quad (3)$$

összefüggésekkel írhatók fel, ahol az r és k felső index a referencia és a következő szórópontot jelöli, λ a hullámhossz, R a távolság és $\{.\}$ a maradékképzés függvénye. (A GPS technika esetében fázismérésen az egész és tört hullámhosszak számát értették, ezért nem szoroztak 2π értékkel).



4. ábra. Balra a mester, középen a szolga és jobbra az interferogram fázis képe látható. (A kivágat Sandwell et al. 2011 alapján készült.)



5. ábra. Az interferometrikus alapegyenlet geometriai értelmezése. R a műhold szórópont távolságokat, B a bázisvonalat jelöli, n és p alsó index a merőleges és párhuzamos bázisvonal komponenseket, az m és s alsó index a mester és szolga felvételeket, r és k felső index a referencia és következő szórópontot jelöli. θ_l és θ_i a látó- és beesési szög (ebben az esetben azonos), α a bázisvonal vízszintes síkkal bezárt szöge, q az r és k szórópontok merőleges bázisirányú, Δs a párhuzamos bázisirányú távolsága, Δh a magasság különbség és c a szórópontok közötti vízszintes távolság (felbontási cella).

Az R távolságokat csak néhány méter pontossággal ismerjük. Ha azonban feltételezzük, hogy a műholdról a közeli pixelekre vonatkozó irányok párhuzamosnak tekinthetők, amit megtehetünk, mivel a ferde távolságok megközelítőleg 850 km; az m és s műholdak közötti távolságok (a bázisvonalak) csak néhány száz méter hosszúak ($3\sigma \cong 1$ m), akkor a különbségek az 5. ábra bekarikázott része alapján a műholdak bázis komponenseiből pontosabban meghatározhatók

$$\begin{aligned} B_n &= B \cos(\theta_l - \alpha), \\ B_p &= B \sin(\theta_l - \alpha), \end{aligned} \quad (4)$$

ahol B a két műhold közötti bázisvonal a műholdpályára merőleges síkban, B_n a merőleges és B_p a párhuzamos bázisvonal, θ_l a látó szög és α a bázisvonal vízszintes síkkal bezárt szöge. A párhuzamossági feltétel alapján a ΔR távolságok gyakorlatilag azonosnak tekinthetők a párhuzamos bázisvonalakkal:

$$\begin{aligned} B_p^r &\cong \Delta R_{ms}^r \\ B_p^k &\cong \Delta R_{ms}^k \end{aligned} \quad (5)$$

továbbá az 5. ábra alapján felírhatjuk a

$$\frac{B_p^r - B_p^k}{B_n^r} \cong -\frac{q}{R_m^r} \quad (6)$$

hasonlóságot, ahol B_n^r a referencia szórópontra vonatkozó merőleges, B_p^r a párhuzamos bázisvonal és q a két szórópont R_m^r távolságára merőleges irányú eltérése. A mért értékeket behelyettesítve az interferometrikus alapegyenlethez jutunk (Ferretti et al. 2007):

$$\Delta\phi^{rk} \cong -\frac{4\pi B_n^r q}{\lambda R_m^r}, \quad (7)$$

amely a

$$\Delta\phi^{rk} \cong -\frac{4\pi B_n^r \Delta h}{\lambda R_m^r \sin \theta_i} - \frac{4\pi B_n^r \Delta s}{\lambda R_m^r \tan \theta_i} \quad (8)$$

alakban felírva tartalmazza a Δs párhuzamos bázisirányú eltérést és a Δh magasságkülönbséget is. Az 5. ábrán a θ_l és a θ_i beesési szögek a vízszintes modell miatt azonosak, az utóbbi érték az ellipsoid felületén közel 3 fokkal nagyobb.

Ha a Δs komponensből származó interferometrikus taggal korrigáljuk a méréseket a két pixel magasság különbségét tudjuk meghatározni, amit a topográfiai modellek létrehozása során alkalmaznak. A Δs komponens és a földgörcsületből származó korrekciók figyelembe vételét simításnak (flattening) nevezik.

Ha a mester és szolga felvételek időpontjai között a két pixel relatív helyzete is megváltozott a (8) összefüggés tovább bővíthető

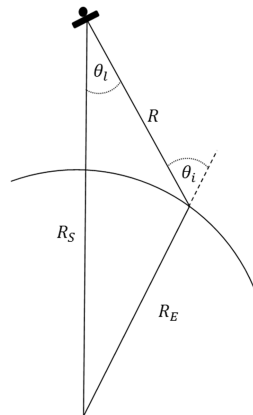
$$\Delta\phi^{rk} \cong -\frac{4\pi B_n^r \Delta h}{\lambda R_m^r \sin \theta_i} - \frac{4\pi B_n^r \Delta s}{\lambda R_m^r \tan \theta_i} + \frac{4\pi D^{rk}}{\lambda} + \Delta A^{rk} + n^{rk}, \quad (9)$$

ahol D a műhold látóirányú (LOS – line of sight) elmozdulás (vagy deformáció), A az atmoszférikus hatás és n a mérési zaj. Deformáció-vizsgálati célnál mind a két geometriai tagot korrekcióba kell venni, és az atmoszférikus hatást és a mérési zajt szűréssel próbálják csökkenteni. GPS szóhasználatnál élve a (3) képlet első két sora a műholdak közötti egyszeres, a harmadik sora a kettős különbségnek felel meg, ezért gyakran a differenciális InSAR (D-InSAR) elnevezést is használják. (Abban a nagyon ritka esetben, amikor B nagyon kis érték, közvetlenül egy pixel mozgását lehetne meghatározni.) A szokásos konvenció szerint negatív a D értéke akkor, ha a szórópont távolodott, és pozitív, ha közeledett a műholdhoz.

A (4) és (8) összefüggésekben az α , θ_l és θ_i szögek is hibával terhelt mennyiségek. A 5. és 6. ábrának megfelelően ezek a mennyiségek a következő összefüggésekkel számíthatók (Sandwell et al. 2011)

$$\begin{aligned} \alpha &= \tan^{-1}\left(\frac{B_v}{B_h}\right), \\ \theta_l &= \cos^{-1}\left(\frac{R^2 + R_s^2 - R_E^2}{2 R R_s}\right), \\ \theta_i &= \pi - \cos^{-1}\left(\frac{R^2 + R_E^2 - R_s^2}{2 R R_E}\right), \end{aligned} \quad (10)$$

ahol B_v a bázisvonal vízszintes, B_h a magassági komponense, R_s a műhold geocentrális távolsága, R a műhold szórópont távolság és R_E a szórópont geocentrális távolsága. A 2. táblázat jellemző adatai alapján a hibaterjedés törvényének megfelelően megbecsültük néhány levezetett paraméter értékét és középhibáit.



6. ábra. A θ_l és θ_i látó- és beesési szög meghatározásának geometriája gömbi megközelítésben

Mivel

$$\Delta s \cong \Delta R \cos \Delta \theta_l, \quad (11)$$

ahol $\Delta \theta_l$ az r és k szórópontok közötti kis látószög különbség és ΔR az ferde irányú távolságok ismert különbsége, a Δs középhibáját jóval nagyobb (a műhold pozíció) középhibával vettük figyelembe. A táblázatból is jól látszik, hogy a kevésbé pontos műhold paramétereiből ($3\sigma \cong 0.9$ m) és a terepmodellből ($3\sigma \cong 9$ m) becsült értékek sem befolyásolják lényegesen a mért fázisértékek korrekcióját, ami a B_n/R hányados kis értékének a következménye. A táblázat adatai alapján a (8) első tagjából egy hullámhosszra vonatkozóan $\Delta h = 740$ m adódik, amit a többértelműség magasságának neveznek (azaz 740 m magassági változás okozna egy hullámhossznyi fáziskülönbség változást).

4 A reflektáló felületek jellemzői és a feldolgozás módszerei

Az előző részben a jelentősebb hibaforrásokat úgy mutattuk be, hogy a felbontási cellákat egy szóróponttal helyettesítettük. A gyakorlatban azonban a földfelszínen egy közelítőleg 20 m x 4 m felbontási cellából származó szuperponálódott jelet vizsgálunk, ahol a reflektivitás a felszínborítás fizikai tulajdonságaitól is lényegesen függ (érdesség, anyag minőség és dielektromos állandó).

A szóró felületeket lényegében négy nagy kategóriába lehet besorolni (7. ábra). Az egyedi szórópontok az adott felbontási cellában dominánsak, a koherenciájuk időben is nagyon sokáig megmarad, a környezetük hatása nagyrészt elhanyagolható. Ilyenek pl. bizonyos mesterséges tárgyak, vagy erre a célra tervezett mesterséges reflektorok, amelyeknek a pontos helyét is ismerjük.

A második kategóriába tartozó cellákban domináns (permanens) szórópontok is találhatóak, a szuperponálódott jelek részben kioltják egymást, részben a domináns pontok kisebb bizonytalanságát is okozhatják.

Az elosztott (distributed) felületeknél a szuperponálódott jelek részben kioltják egymást, de egy zajosabb, viszonylag konzisztens átlag értékkel is rendelkezhetnek, amelyek akár nagyobb pixel tartományokban (szegmensekben) is jellemzőek lehetnek.

Az utolsó inkohereus kategóriában a jelek részben kioltják egymást és az átlagértékük is időpontként és területi szegmensekben is véletlen jellegű változást mutatnak. Ezek általában a növényzettel borított, széljárta területek, amelynek az amplitúdói is foltos képet szolgáltatnak. Deformáció vizsgálati célra ezek a területek nem alkalmasak.

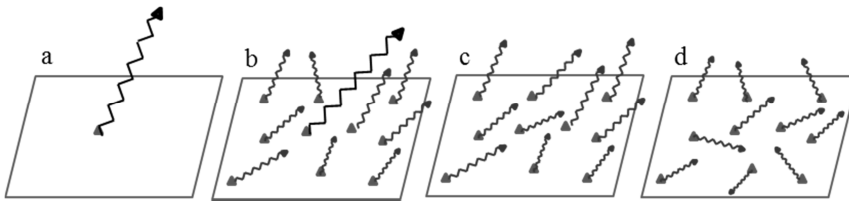
2. táblázat. Néhány közelítő és levezetett érték középhiba becslése.

$\phi(\Delta s)$ és $\phi(\Delta h)$ a (8) képlet első és második összetevője

Paraméter	közéltítő érték [m]	középhiba [m]	levezetett paraméter	levezetett érték	középhiba
B_v	100	0.3	B_n	206 m	0.297 m
B_h	50	0.3	B_p	16 m	0.042 m
R_s	7178000	0.3	α	27°	9"
R	850000	3.0	θ_l	19°	3"
R_E	6378000	3.0	θ_i	21°	3"
Δs	8	0.3	$\phi(\Delta s)$	-0.010 m	0.000 m
Δh	30	3.0	$\phi(\Delta h)$	-0.040 m	0.002 m

Az InSAR technológia szempontjából a legkedvezőbbek az első két kategóriába tartozó sivatagi, vagy növényzetborítás nélküli (pl. vulkáni) területek, ahol a nagyobb földrengések vagy egyéb elmozdulások során jelentkező deformációkat egyértelműen kirajzolják az interferometrikus feldolgozás diffrakciós csíkjai.

A vizsgálatokra kevésbé alkalmas (pl. mezőgazdasági) területeken speciális módszereket dolgoztak ki. A rövid bázis vonalú (SBAS) módszernél a nagy koherencia érdekében időben közeli és rövid bázisvonallal jellemezhető képpárok feldolgozását hajtják végre, ahol az első két kategóriához hasonlóan több koherens pixel is nagy valószínűséggel azonosítható lehet (Lanari et al. 2007).



7. ábra. A szóró felületek fontosabb kategóriái. a) egyedi szóró pont, b) domináns szóró pont, c) elosztott szóró felület, d) inkonzisztens szóró felület

Egy másik megoldásnál megkeresik a vizsgált felvételesorozatokon egyértelműen azonosítható első és második kategóriába tartozó szórópontokat, és ezeknek a feldolgozását hajtják végre (Hooper et al 2004). A módszernek több elnevezése is ismert (PS-InSAR, PSI) ahol a PS a szórópontok állandóságára utal (Permanent vagy Persistent Scatters).

A feldolgozást a harmadik kategóriába tartozó cellákra is kiterjesztették, amit a megfelelő szűrési technikák kidolgozása tett lehetővé. Az irodalomban a DS-InSAR elnevezéssel is találkozunk, ahol DS most az elosztott szórópontok (Distributed Scatters) kifejezésre utal (Ferretti et al. 2011). Az SBAS és PSI módszerek együttes alkalmazására Hooper (2008) dolgozott ki egy eljárást.

A bemutatott módszereknél a geometriai korrekciók, az atmoszférikus hatások és a mérési zaj szűrését követően soronkénti, de általában síkbeli, vagy idősorok esetében háromdimenziós fáziskicsomagolást hajtanak végre, és a feldolgozás eredményeként az azonosított pontok műholdirányú változásainak idősorát is előállítják.

A feldolgozások lényeges része az előforduló hibahatások felismerése és szűrése, továbbá az elmozdulások más pl. geodéziai mérésekkel, geodinamikai vagy geomorfológiai modellekkel történő azonosítása is.

5 Összefoglalás

Ebben a tanulmányban röviden összefoglaltuk az interferometrikus műholdas SAR technológia fontosabb jellemzőit és geometriai alapösszefüggéseit. A hibaterjedés segítségével bemutattuk, hogy megfelelő műhold koordináták, ferde távolságok és terepmodell segítségével a korrigált fázismérések alkalmasak nagy pontosságú műholdirányú elmozdulások meghatározására. A szóró felületek jellemzőit négy kategóriában mutattuk be.

Összefoglaltuk az interferometrikus adatfeldolgozás fontosabb lépéseit (fókuszálás, tömörítés, megfeleltetés, újra-mintavételezés, interferogram készítés, simítás, szűrés, deformációs diffrakciós csíkok előállítás, fáziskicsomagolás, PS idősorok előállítás és georeferálás).

Intézetünk megújulási programjának keretében a hagyományos geodinamikai vizsgálatainkat az InSAR technológiával kívánjuk kiegészíteni. A nagy időállandójú geodinamikai folyamatok megfigyeléséhez leszálló és felszálló irányú megfigyelésekre is alkalmas geodéziai alappontok tervezését, telepítését és az ingyenes Sentinel-1A adatok alkalmazhatóságát kívánjuk megvizsgálni.

A tervezett alappontoknál a le- és felszálló műhold irányú elmozdulások is ugyanarra a pontra vonatkoztathatók, és az elmozdulások két komponense is meghatározhatóvá válik.

Első lépésben megismertedtünk a StaMPS (Hooper 2008) programrendszer használatával, amit a szoftver készítője soproni látogatása során mutatott be a Geodinamikai Kutatócsoport tagjainak.

Köszönetnyilvánítás. Köszönettel tartozunk Prof. Andy Hooper és Dr. Karsten Spaans kollegáknak a StaMPS programcsomag használatának elsajátításában nyújtott segítségével, továbbá az MTA CSFK vezetésének az új kutatási program infrastrukturális támogatásáért.

Hivatkozások

Cuenca MC, Hooper A J, Hanssen RF (2013): Surface deformation induced by water influx in the abandoned coal mines in Limburg, the Netherlands observed by satellite radar interferometry. *J. Applied Geophys.*, 88, 1-11.

- Davidson M, T Le Toan, Mattia F, Satalino G, Satalin T, Borgeaud M** (2000): On the characterisation of Agricultural soil roughness for Radar Remote sensing studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38, 630-640.
- Farr TG, Rosen PA, Caro E, Crippen R, Duren R, Hensley S, Kobrick M, Paller M, Rodriguez E, Roth L, Seal D, Shaffer S, Shimada J, Umland J, Werner M, Oskin M, Burbank D, Alsdorf D**, (2007): The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2).
- Ferretti A, Monti-Guarnieri A, Prati C, Rocca F, Massonnet D** (2007): *InSAR principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. ESA publications, ESTEC, The Netherlands.
- Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, Prati C, Rocca F, Rucci A** (2011): A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49, 3460-3470.
- Grenerczy Gy, Wegmüller U** (2011): Persistent scatterer interferometry analysis of the embankment failure of a red mud reservoir using ENVISAT ASAR data. *Natural Hazards*, 59(2), 1047-1053.
- Grenerczy Gy, Wegmüller U** (2013): Deformation analysis of a burst red mud reservoir using combined descending and ascending pass ENVISAT ASAR data. *Natural Hazards*, 65(3), 2205-2214.
- Hooper A, Zebker H, Segall P, Kampes B** (2004): A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31, 1-5.
- Hooper A** (2008): A combined multi-temporal InSAR method incorporating persistent scatterer and small baseline approaches. European Space Agency, Special Publication.
- Hooper A, Bekaert D, Spaans K, Arikian M** (2012): Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514-517, 1-13.
- Lanari R, Casu F, Manzo M, Lundgren P** (2007): Application of SBAS DInSAR technique to fault creep: A case study of the Hayward Fault, California. *Remote Sensing of Environment*, 109(1), 20-28.
- Martinez J M, Flourey N, T Le Toan, Beaudoin A, Hallikainen M T, Makynen M** (2000): Measurements and modelling of vertical backscatter distribution in forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38, 710-719.
- Sandwell D, Mellors R, Tong X, Wei M, Wessel P** (2011): *GMSTAR: An InSAR Processing Systems Based on Generic Mapping Tools*. Scripps Institution of Oceanography, Technical Report.
- Petrik O** (2007): Műholdas radar-interferometria hazai alkalmazása: felszín-süllyedés-vizsgálat Debrecen környékén. *Geodézia és Kartográfia*, 3, 19-25.

