

Műholdradar-interferometriás alkalmazások fejlesztése a tektonikus folyamatok megfigyelésében

BÁNYAI L.¹, NAGY L.², BOZSÓ I.¹, SZÚCS E.^{1,®}, WESZTERGOM V.¹

¹MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet, 9400 Sopron, Csatkai E. u. 6–8.

²BME Szélessávú Villamosságtan és Hírközlési Tanszék, 1111 Budapest, Egry József utca 18.

®E-mail: Szucs.Esster@csfk.mta.hu

A szintetizált apertúrájú radar (SAR) a földfelszín mikrohullámú reflexiós képét állítja elő. A radarfelvételek interferometrikus feldolgozása révén a fél hullámhosszon belüli elmozdulások nagy pontossággal határozhatók meg. A reflektált jel a reflektáló felület geometriai és elektromágneses tulajdonságaitól, valamint a szenzor jellemzőitől függ. A nagy időállandójú tektonikus folyamatok radarinterferometriai módszerrel történő megfigyeléséhez olyan markáns és stabil reflexiók szükségesek, amelyek kiemelkednek a háttérreflexióból. Ez a tanulmány a Sentinel-1 műhold (C-sáv, $\lambda = 5.55$ cm) paramétereire alapján tervezett, időben stabil fázist biztosító mesterséges passzív szórópontok (reflektorok) tervezését, a kapcsolódó vizsgálatokat és a megvalósult geodinamikai hálózatokat ismerteti röviden.

Kulcsszavak: mesterséges szórópont, Sentinel-1, InSAR, felszín deformáció

Bányai, L., Nagy, L., Bozsó, I., Szűcs, E., Wesztergom, V.: Development of satellite radar interferometry applications for observation of tectonic processes

The microwave synthetic aperture radar (SAR) systems provide the reflection images of the Earth surface. The interferometric processing of the SAR images provides high precision surface deformations that are shorter than the half wavelength. The reflected signal depends on the geometric and electromagnetic properties of the surface and the characteristics of the sensor. The observation of tectonic processes with long characteristic time by means of radar interferometry requires dominant and stable backscatterers, which are above the background signal level. This paper shortly describes the planning and related studies of dominant, phase-stable artificial passive backscatterers (reflectors) based on the parameters of the Sentinel-1 SAR satellite (C-band, $\lambda = 5.55$ cm) and used in practical geodynamical networks as well as the established geodynamical networks.

Keywords: artificial backscatterer, Sentinel-1, InSAR, surface deformation

Beérkezett: 2018. május 4.; *elfogadva:* 2018. június 22.

1. Bevezetés

A geodinamikai folyamatok megfigyelésében a hagyományos geodéziai mérési módszerek mellett egyre inkább áthelyeződik a hangsúly az ürgeodéziai eljárásokra (Elliott et al. 2016), amelyek globális vonatkoztatási rendszerben nagy pontossággal szolgáltatják a felszíni deformációkat. Az Európai Űrügynökség (ESA) Copernicus programja a földmegfigyelések új fejezetét nyitotta meg. Az elsőként pályára állított Sentinel-1A/B műholdak a mikrohullámú távérzékelés módszerével a különböző

eredetű felszínmozgások nagy területre kiterjedő, időben nagy felbontású meghatározását teszik lehetővé (Li et al. 2016). A különböző időpontokban készült Sentinel-1 műholdradar (SAR) felvételeinek interferometrikus (InSAR) feldolgozása a földfelszín geometriai változásainak nagy pontosságú időbeli követését teszi lehetővé. A globális navigációs műholdrendszerek (GNSS) eredményeivel szemben a műholdradar-interferometria a felszíni deformációk műholdirányú (*line-of-sight*, LOS) távolságváltozásának fél hullámhosszon belüli értékeit adja meg.

A két eljárás integrálásával, azok előnyeiket kihasználva, a felszín nagy pontosságú, 3D-s, abszolút értelmű és térben részletes deformációi határozhatók meg. A módszer lehetőségét nyithat olyan tektonikus folyamatok vizsgálatára, melyek esetében a hagyományos technikák eddig nem hoztak eredményt. A radarjel terjedése szempontjából számos korlátozó tényező jelentkezik, emellett a nagy időállandójú geodinamikai, tektonikai folyamatok megfigyeléséhez olyan stabil kialakítású pontjelek szükségesek, amelyek lehetővé teszik a bekövetkezett elmozdulások pontos meghatározását. Az interferometrikus feldolgozás szempontjából alapvető fontosságú ugyanis, hogy a visszavert jel fázisa időben stabil legyen, mert az ilyen típusú, ún. állandó szórópontú (*persistent scatterer*) felbontási cellák biztosítják hosszú távon az alacsony jel/zaj arányt és így a SAR felvételek időszerelemzésén alapuló felszíni deformációk meghatározását.

A tanulmány 2. fejezetében röviden összefoglaljuk a Sentinel-1 SAR (Szintetikus Apertúrájú Radar) műholdrendszer fontosabb paramétereit, míg a 3. fejezetben az integrált geodinamikai alappontok gyakorlati jelentőségét tárgyaljuk. A jelentősebb reflektortípusok elektromágneses (EM) vizsgálatát és méretezését a 4. fejezet foglalja össze. Az 5. fejezet az integrált geodinamikai alappontok komplex tervezését, míg a 6. fejezet a tervezett alappontok analóg vizsgálatát tartalmazza, amelyet a BME Szélessávú

Hírközlés és Villamosságtan Tanszék antennakalibráló laborjában hajtottak végre. A tanulmány végén röviden bemutatjuk a telepített hálózatokat (7. fejezet) és összefoglaljuk a kezdeti tapasztalatainkat.

2. A Sentinel-1 SAR rendszer

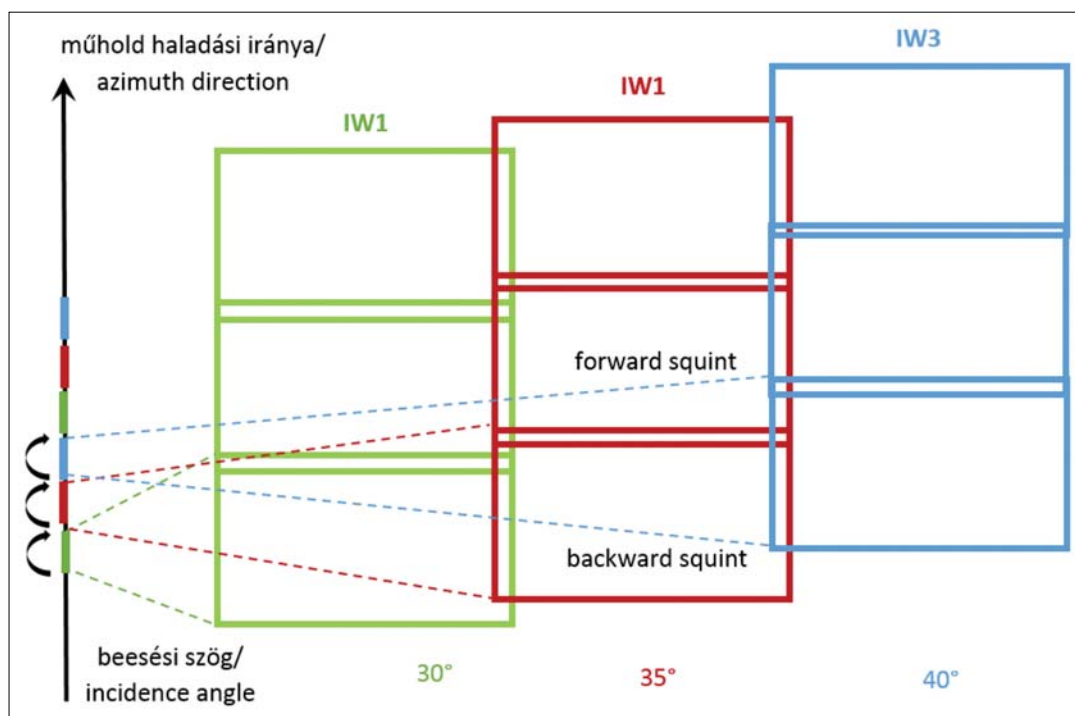
Az ESA Sentinel-1 műholdrendszere a mikrohullámú tartományban végzi a teljes földfelszín leképezését. A SAR rendszer Sentinel-1A műholdja 2014 áprilisában, a B jelű műholdja 2 évvel később, 2016 áprilisában került felbocsátásra, ezzel teljessé vált a konstelláció. A közel poláris, napszinkronpályán megközelítőleg 700 km magasságban keringő Sentinel-1 műholdpár a C-sávú (5.405 Hz) apertúraszintézises radarberendezéssel végzi a teljes földfelszín térképezését 6 naponta. A Sentinel-1 négyféle módban térképezi a felszínt (Sentinel-1 User Handbook), melyek közül a nagy területi lefedést és közepes felbontást biztosító IWS (interferometric wide swath) mód alkalmas a felszíni deformációk regionális léptékű meghatározására.

A Sentinel-1 SAR rendszer és az IWS mérési mód főbb paramétereit mutatja be az 1. táblázat. A SAR szenzor egyik legfontosabb jellemzője a hullámhossza (frekvenciája) a detektálható deformáció mértékét határozza meg, emellett a frekvencia függvényében az elektromágneses

1. táblázat A Sentinel-1 SAR főbb műszaki paramétereit és az IWS mérési mód jellemzőit (Sentinel-1 User Handbook)

Table 1 Basic technical parameters of Sentinel-1 mission and characteristics of IWS acquisition mode

<i>Sentinel-1 SAR paraméter</i>	<i>Érték</i>
vivőfrekvencia (<i>centre frequency</i>)	5,405 GHz
sávszélesség	0, ... ,100 MHz
polarizáció	választható: HH + HV and VV + VH
antennaméret	12,3×0,821 m
jel (pulzus) szélessége (<i>pulse width</i>)	5–100 µs (programozható)
pulzusisméltési frekvencia	1000–3000 Hz (programozható)
műhold tömege	945 kg
<i>IWS paraméterek</i>	<i>Érték</i>
egy felvétel (sáv) szélessége (<i>swath width</i>)	250 km
beesési szög tartománya egy sávon belül	29,1°– 46,0°
alsávok száma (<i>sub-swath</i>)	3
antenna azimut irányú forgatási szöge	±0.6°
azimut és távolság irányú felbontás (<i>azimuth and range looks</i>)	egyszeres (single)
polarizációs opciók	kettős HH + HV, VV + VH
egyedi HH, VV	
SAR rendszer mérési érzékenysége (<i>maximum noise equivalent sigma zero – NESZ</i>)	–22 dB
radiometriai stabilitás	0,5 dB (3σ)
radiometriai pontosság	1 dB (3σ)
fázishiba	5°
felbontás (<i>rg × az</i>)	2,7×22 m 3,5×22 m között
pixelméret (<i>rg × az</i>)	2,3×14,1 m



1. ábra A Sentinel-1 TOPS IWS felvételi mód Gonzales et al. (2015) alapján. A leképezés során az EM nyalábot azimut (*az*) irányban mozgatják, hogy az egyes *swathen* (IW1, IW2 és IW3 sávokon) belüli *burstok* felvételezésére, majd haladási (*range, rg*) irányban elektronikusan mozgatják az antennát (θ beesési szögnek megfelelően) az egyes sávok leképezésére

Figure 1 Imaging geometry of the TOPS IWS mode based on Gonzales et al. (2015). The EM beam is steered along azimuth (*az*) direction to image every bursts of the swaths (IW1, IW2 and IW3), then the antenna is steered electronically in range (*rg*) direction (according to the incidence angle θ) to image the whole swath

(EM) jelek terjedési sebességét más mértékben módosítja az atmoszféra hatása, amely az egyik legnagyobb zajforrás a SAR felvételek interferometrikus feldolgozása során. A SAR rendszer felbontását a sáv szélesség határozza meg. A haladási (azimut, *az*) irányú felbontás a jel Dopplersáv szélességétől, a műhold sebességétől, az antenna méretétől függ; a haladási irányra merőleges (*range, rg*) távolság irányú felbontás a sáv szélesség függvénye. A földfelszíni felbontás továbbá mindkét irányban a beesési szög (*incidence angle, θ*) függvénye. A SAR felvétel pixelmérete a felbontással akkor egyezik meg, ha a sáv szélesség azonos a mintavételi frekvenciával, általában azonban a felvételeket különböző jelfeldolgozási szempontok miatt felülmintavételezik, így a pixelméret kisebb, mint a tényleges felbontás, ahogy a Sentinel-1 esetében is. Egy felvétel által lefedett terület az antenna méretétől és a beesési szögtől függ, a Sentinel-1 IWS módja az ún. TOPS (*Terrain Observation with Progressive Scans*) leképezési eljárást alkalmazza lehetővé téve viszonylag nagy, megközelítőleg 250 km széles sávok térképezését (1. ábra).

3. Integrált geodinamikai alappontok jelentősége

Az űrgeodéziai módszerek megjelenésével a földfelszín deformációinak meghatározása a hagyományos geodéziai módszerekhez képest egyszerűbb és gyorsabb lett, keve-

sebb emberi erőforrást igényelve. A GNSS és InSAR módszerek önmagukban is alkalmasak a felszín folyamatainak vizsgálatában, azonban ezeket együttesen alkalmazva a két módszer egymást kiegészítve a felszíni deformációk abszolút értelemben, jó felbontásban, nagy területre kiterjedve határozhatók meg.

A GNSS mérések abszolút értelmű, ellipszoidi földrajzi koordináták sorozataként, 3D-ban adják meg valamely kezdő időponthoz képest a bekövetkezett deformációkat. A műholdradar-interferometria kétszeresen relatív módszer, két időpont között előállított interferogram egy pixelének fázisváltozásán keresztül vizsgálható a felszín deformációja egy másik pixelhez képest. Az InSAR módszer viszonylag nagy területre (Sentinel-1 esetén 1 felvétel szélessége megközelítőleg 250 km), jó időbeli (néhány nap) és térbeli felbontással (~50–100 m² felbontási cellaméret) adja meg az 1D-ba leképezett műholdirányú deformációkat. A módszer a közel poláris pályán keringő műhold (általában) jobb oldalra néző kialakításának és a viszonylag meredek látószögnek (*look angle*) következtében leginkább a vertikális irányú deformációkra érzékeny.

A SAR rendszerek általános paramétereit figyelembe véve az elmozdulás vektor vertikális (U), észak-dél (N) és kelet-nyugat (E) irányú összetevői jó közelítéssel a következő arányok szerint képződnek le a műholdirányú LOS vektorban (Hanssen 2001):

$$d_{LOS} = [0,92, 0,07, 0,38][d_U, d_N, d_E]^T.$$

A két módszer jellemzőit és alapvető különbségeit szem előtt tartva hasonlíthatók össze adekvát módon a meghatározott deformációk, illetve fejleszthetők ki azok a matematikai eljárások, amelyek a két módszer kombinálásán alapulnak. Bányai et al. (2017) egy Kálmán-szűrőn alapuló eljárást javasolt, amely egy integrált alaponra vonatkozó le- és felszálló irányú LOS deformációkat kombinálja időszakonként végzett GNSS mérésekkel, ezzel lehetővé téve a 3D sebességtér-meghatározást.

A GNSS mérések, állomások kialakításának követelményei viszonylag jól dokumentáltak a szakirodalomban, ezzel szemben a mesterséges szóróponton alapuló műholdradar-interferometria kevésbé elterjedt. A korábbi vizsgálatok elsősorban kalibrációs célokat szolgáltak (Ferretti et al. 2007, Marinkovic et al. 2008). A Sentinel-1 pályára állításával, a nagy mennyiségű SAR adat nyílt hozzáféréseivel ebben gyökeres változás következett be, és sorra jelennek meg azok a publikációk és kísérleti tanulmányok, amelyek költséghatékony, hosszú távú deformációmonitoringot biztosító mesterséges szórópontok geodéziai, elektromágneses tervezésével, kialakításával foglalkoznak (Parker et al. 2017, Garthwaite 2017, 2018). A GNSS és radarinterferometriai módszer által szolgáltatott deformációk adekvát összehasonlítása, illetve a módszerek integrálása olyan geodéziai pontjelek kialakításával lehetséges, amelyek hosszú időn keresztül stabil fázisú, alacsony fáziszajú felbontási cellát eredményeznek a SAR felvételeken, lehetővé téve a különböző InSAR idősorlemezési eljárások alkalmazását. A kollokált GNSS és InSAR mérések biztosítják, hogy az elmozdulások ugyanarra a felbontási cellára vonatkoznak a felvételen, így a meghatározott mozgás-

értékek a geodéziai/geodinamikai követelményeknek megfelelnek. Kis magnitúdójú (néhány mm/év sebességű) geodinamikai folyamatoknál, ahol az elmozdulás értéke a módszer észlelési küszöbe körüli, az integrált geodinamikai pontjelek növelhetik a meghatározott deformációk pontosságát, segítve a folyamatok helyes tektonikai értelmezését.

4. Jelentősebb reflektortípusok EM vizsgálata és méretezése

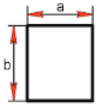



Az EM vizsgálatok célja a mesterséges szóróobjektumok (*artificial backscatter*) azon paramétereinek meghatározása, amelyek kis fáziszajú, domináns reflexiót biztosítanak a Sentinel-1 mikrohullámú SAR felvételein. Analitikus és numerikus számítások, valamint analóg modellkísérletek eredményei alapján kerültek meghatározásra azok a mesterséges reflektortípusok, melyek a Sentinel-1-en alapuló, nagy pontosságú deformációmonitoringot lehetővé teszik. A geodinamikai és EM kialakítás szempontjai egymáshoz szorosan kapcsolódnak, a kétféle tervezés párhuzamosan történt.

4.1. Analitikus számítások

A mesterséges céltárgyak EM tulajdonságairól angol nyelven részletes összefoglalót adnak Polycarpou et al. 1995, Brooker 2009, Garthwaite et al. 2013, 2015, valamint Garthwaite 2017, 2018 munkái, melyek alapján röviden áttekintjük a legfontosabb fogalmakat és méretezési irány-

2. táblázat Mesterséges szóróobjektumok maximális hatásos szórási keresztmetszete az optikai tartományban (objektum mérete \gg a hullámhossz) (Brooker 2009 alapján). Élhosszak: $a = b = 1$ m és a hullámhossz: $\lambda = 0,055$ m

Table 2 Maximum radar cross section of various artificial backscatters considered as electrically large targets (size of targets \gg wavelength) (based on Brooker 2009). Side length: $a = b = 1$ m and wavelength: $\lambda = 0.055$ m

	Reflektortípus	RCS	m ²	dBm ²
	síkflektor, [a, b] méret	$\sigma = 4\pi a^2 b^2 / \lambda^2$	4084,7	36,1
	dihedrális (90°) sarokreflektor, maximális hatásos felület $ab\sqrt{2}$	$\sigma = 8\pi a^2 b^2 / \lambda^2$	8169,4	39,1
	háromszöglappokkal határolt trihedrális sarokreflektor	$\sigma = 4\pi a^4 / (3\lambda^2)$	1361,6	31,3
	négyszetekkel határolt trihedrális sarokreflektor	$\sigma = 12\pi a^4 / \lambda^2$	12254,1	40,9
	negyedkörrel határolt trihedrális sarokreflektor	$\sigma = 0,507\pi^3 a^4 / \lambda^2$	5109,8	37,1

elveket. A hatásos radarszórás keresztmetszet (σ , RCS) az objektum radarreflexiós képességét jellemzi, a reflektáló felület normális nagyságával normalizált értéke a differenciális RCS. A RCS értéke függ az alkalmazott frekvenciától, az EM sugárzás beesési szögétől, a visszaverő objektum alakjától és anyagától. A RCS mértékegysége m^2 , azonban nagy dinamikája miatt szokás dBm^2 -ben is kifejezni. (A szakirodalomban a m^2 jelölést is gyakran elhagyják, mivel $1 dBm^2$ a viszonyítási érték, amely az $1 m^2$ keresztmetszetű, tökéletesen reflektáló gömbre vonatkozik. A dB dimenzió nélküli mennyiség.) A Sentinel-1 egy monosztatikus SAR rendszer, azaz ugyanaz az antenna szolgál a jelek sugárzására, mint a vételére. Monosztatikus esetben, sík beeső hullám és távolférfi megfigyelési pont ($R \rightarrow \infty$) esetén a hatásos keresztmetszet:

$$\sigma = 4\pi \lim_{R \rightarrow \infty} R^2 (|E_{\text{scatter}}|^2 / |E_{\text{incident}}|^2), \quad (1)$$

ahol R a megfigyelési pont távolsága a céltárgytól, E_{scatter} a szórt tér elektromos térerőssége és E_{incident} a céltárgyra beeső elektromos tér térerőssége. Elektromágnesesen nagy (az objektum mérete \gg a hullámhossz, az ún. optikai tartomány) és veszteségmentes visszaverő objektumok esetén az RCS:

$$\sigma = 4\pi (A_{\text{geom}}^2 / \lambda^2), \quad (2)$$

ahol A_{geom} a céltárgynak a beeső tér irányába mutatott hatásos felülete. A 2. táblázat a leggyakrabban alkalmazott reflektorok elméleti maximális hatásos radar szórás keresztmetszetét foglalja össze.

A sík- és dihedrális reflektorok azonos élhosszúság mellett viszonylag nagy RCS-t biztosítanak (2. táblázat), azonban tükröszerűen viselkednek, így nagyon nagy ($<1^\circ$) pontossággal kell tájékozni ezeket a beesési szögnek megfelelően. Ezért a továbbiakban vizsgálataink az ún. trihedrális reflektorokra korlátozódnak, amelyeket egyszerűen sarokreflektornak (CR, *corner reflektor*) is neveznek.

A SAR felvételen egy-egy felbontási cella fázisértéke a kétutas terjedésből származó fázis (*two-way propagation phase*) és a cella integrált fázisértékének (*surface backscatter phase*) az összege. (Az érdeklődő olvasó a radarinterferometriáról angol nyelven Rosen et al. (2000) és Ferretti (2014) összefoglaló munkái, magyar nyelven Bányai et al. (2014) alapján tájékozódhat.). Utóbbit a felbontási cellá-

ban található valamennyi objektum együttesen alakítja ki, a Sentinel-1 esetében a felbontási cella mérete $\sim 60\text{--}80 m^2$ (a megvilágítás szögétől függően). A mesterséges reflektorok reflexióját a felbontási cella „háttér”-reflexiója rontja le, az SCR (*Signal-to-Clutter Ratio*) a két mennyiség hányadosa. A mesterséges reflektor által biztosítandó szükséges reflexiós érték és az ehhez tartozó geometriai méretek a zavaró háttérreflexió ismeretében határozhatók meg. A Sentinel-1 misszió paramétereit (felbontási cella mérete, megvilágítás szöge, hullámhossz) valamint a különböző felszínborítások reflexiós tulajdonságait figyelembe véve a háttérzaj (*clutter*) értéke átlagosan -12 dB-nek tekinthető. A reflektor által biztosítandó szükséges reflexiós érték és ezen keresztül a reflektor geometriai méretei a fázismérés hibájából (a LOS vektor kívánt meghatározási pontosságából) határozható meg. Adam et al. (2004) megmutatta, hogy nem korrelált háttérzaj esetén a fázismérés szórása a SCR függvénye, mely felhasználásával a műholdirányú LOS hiba szórása:

$$\sigma_{\text{LOS}} = (\lambda/4\pi) [2 \text{SCR}]^{-1/2}. \quad (3)$$

A (3) összefüggés alapján meghatározhatók a különböző frekvenciákhoz tartozó SCR értékek, amelyek az előírt pontosságú LOS meghatározást biztosítják. A C-sávú Sentinel-1 műhold esetében mm LOS meghatározási hibát előírva $\text{SCR} = 110$ (azaz ~ 20 dB) értéket kapunk, ezzel a reflektor által biztosítandó RCS a háttér -10 dB értékű reflexióját is figyelembe véve 30 dB, ami $1000 m^2$ hatásos keresztmetszetnek felel meg.

A reflektorok lapjainak tökéletesen síknak, az érintkező lapoknak tökéletesen merőlegesnek kellene lenniük. Zink és Kietzmann (1995) alapján a felszín 1 mm középhibájú egyenetlensége $0,3$ dB, Sarabandi és Tsen-Chin (1996) alapján a merőlegesség $0,2$ fok hibája $0,2\text{--}1,0$ dB veszteséget okozhat. A SAR felvételek feldolgozása során további olyan hibahatások is jelentkeznek, amelyek hasonló eltéréseket okozhatnak a LOS vektor meghatározása során (az atmoszféra terjedési sebességmódosító hatása, pályahibák, az alkalmazott digitális magassági modell hibái – DEM hiba, fáziskicsomagolási hiba).

A 3. táblázat a különböző élhosszúságú CR reflektorok hatásos radarszórás keresztmetszetét mutatja. A szükséges $\sim 30\text{--}32$ dB reflexióértéket a háromszög CR a leg-

3 táblázat A vizsgált reflektortípusok különböző élhosszúsághoz tartozó hatásos radar szórás keresztmetszet értékei. A félkövér betűtípus a $\sigma_{\text{LOS}} = 0,3$ mm hibaértéknek megfelelő vagy azt meghaladó élhosszat mutatja

Table 3 Radar cross section as a function of side length of the investigated radar reflectors. The values in bold represent the sizes which satisfies the accuracy requirement of $\sigma_{\text{LOS}} = 0.3$ mm

RCS (dBm^2)	Élhossz [m] háromszög CR	Élhossz [m] negyedkör CR	Élhossz [m] négyzetes CR
25	0,70	0,50	0,40
30	0,93	0,67	0,54
35	1,25	0,90	0,72
40	1,66	1,19	0,96
45	2,22	1,59	1,28

nagyobb élhosszal biztosítja ($a \sim 1$ m), míg a négyzetes CR a legkompaktabb ($a \sim 0,6$ m). Így azonos reflexióérték mellett anyagköltség szempontjából legkedvezőbb a négyzetekkel határolt trihedrális reflektor, ezt követi a negyedkör CR, majd a háromszög CR.

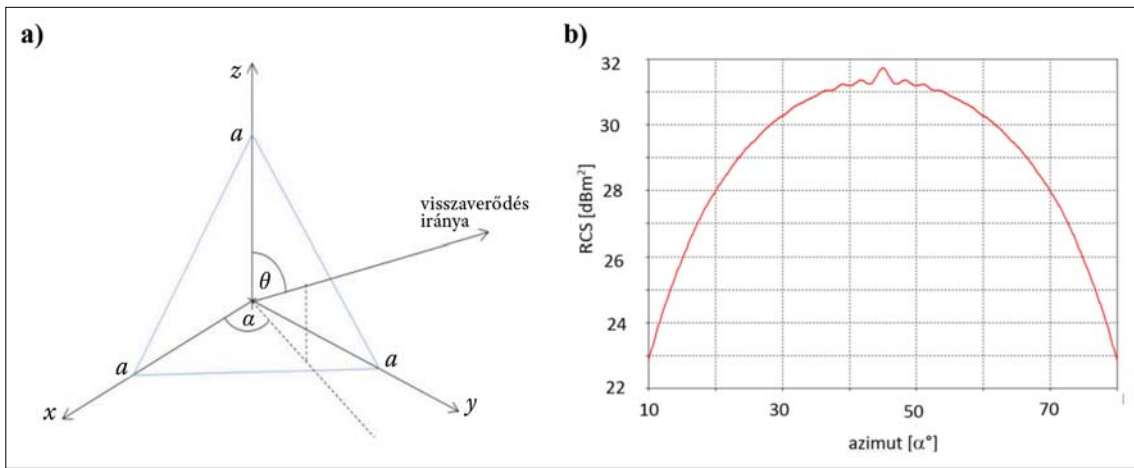
A geodinamikai tervezés és a mechanikai merevség szempontjait figyelembe véve azonban a háromszög CR a legkedvezőbb (ld. később). Így a további vizsgálatok erre a reflektortípusra korlátozódtak.

4.2. Numerikus modellezés

A numerikus modellezést a CST Microwave Studio® elektromágneses szimulátorral végeztük. A 2. ábra a háromszög CR geometriai modelljét mutatja, valamint az optikai modellel (ld. 4.1. fejezet) kapott maximális hatásos szórási keresztmetszet ellenőrzését mutatja be. Az $a = 1$ m él-

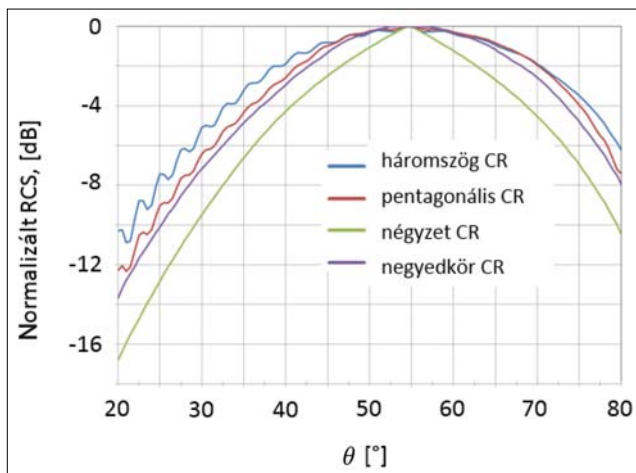
hosszúsághoz tartozó maximális RCS a 2. táblázat alapján $\sigma = 31,3$ dBm², az elméleti érték jó egyezést mutat a numerikus szimuláció maximumával, a maximális érték körüli hullámzás a diffrakció következménye.

A mesterséges szóróobjektumokkal szembeni követelmény, hogy a SAR műholdpályának megfelelően legyenek tájolva, ezzel biztosítva a maximális reflexiót. A numerikus számítások következő lépéseként megvizsgáltuk, hogy a θ beesési szög függvényében hogyan változik a reflektorok szórási keresztmetszete. Minél nagyobb szögtartományban tekinthető konstansnak a reflektált EM sugárzás, annál kedvezőbb a reflektor terepi körülmények között való alkalmazása, mivel annál kevésbé érzékeny a műhold irányába való tájолásra. Korábbi SAR misszióknál (ERS-1/2, Envisat) a műholdpályák megfelelő korrekciójára kevésbé volt lehetőség, amely akár 700–1000 m-es merőleges bázisvonalat eredményezett. (A merőleges bá-



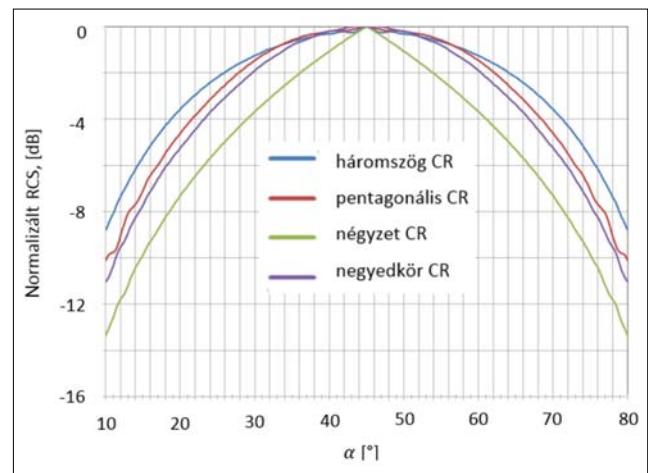
2. ábra a) A háromszög CR geometriai modellje. b) $a = 1$ m élhosszúságú háromszög CR hatásos radarkeresztmetszete a $\theta = 35,264^\circ$ maximális reflexiót biztosító beesési szögben a besugárzás α azimutja függvényében

Figure 2 a.: Geometric model of triangular CR. b.: Radar cross section of the $a = 1$ m side length CR as a function of azimuth α for incidence angle $\theta = 35,264^\circ$, which ensures the maximum reflected energy



3. ábra CR reflektorok radar szórási keresztmetszete a θ beesési szög függvényében $\alpha = 45^\circ$ azimut esetén

Figure 3 Radar cross section of CR reflectors as a function of incidence angle θ for $\alpha = 45^\circ$ azimuth



4. ábra CR reflektorok radar szórási keresztmetszete az α azimut függvényében, a besugárzás szöge $\theta = 54,736^\circ$

Figure 4 Radar cross section of the investigated CR reflectors as a function of azimuth α for incidence angle $\theta = 54,736^\circ$

zisvonal a két felvétel időpontjában a műholdak távolsága a LOS irányára merőlegesen. Nagy merőleges bázisvonal esetén a felvételek távolság (rg) irányú spektrumai nem átfedők.) A Sentinel-1 műhold esetében a merőleges bázisvonal hossza kevésbé kritikus, mivel a műholdat megfelelő pályakorrekciókkal egy 50 m szórású pálya csatornában (*orbital tube*) tartják (Sentinel-1 User Handbook).

A 3. ábra az $a = 1$ m élhosszúságú trihedrális reflektorok normalizált RCS értékeit mutatja a megvilágítás szögének függvényében az $\alpha = 45^\circ$ szimmetriásíkban. A közel konstans reflektáló szögtartomány jellemzésére a $\Theta_{-3\text{dB}}$ félteljesítményű irányélességi szöget alkalmazzák, amely a visszavert EM nyaláb -3dB -es relatív értékeinek fokokban megadott távolsága. A legkisebb irányélességi tartománnyal a négyzetes CR rendelkezik, értéke $\Theta_{-3\text{dB}} = 22,5^\circ$. A többi vizsgált reflektor irányélességi tartománya 30° felett van, a legnagyobb érték a háromszög CR reflektor esetében adódik, mely $\Theta_{-3\text{dB}} = 38,2^\circ$. Az 5. ábra a 4. ábrához hasonlóan a hatásos radar szórási keresztmetszeteket mutatja, azonban fix $\theta = 54,736^\circ$ beesési szög (a maximális visszaverődés iránya) mellett, az a azimutérték függvényében. (A maximális visszaverődési irány a befoglaló kocka testátlójának iránya.) Vízszintes értelmű tájékozási bizonytalanság esetén is a háromszög CR a legkedvezőbb $\Theta_{-3\text{dB}} = 46,3^\circ$ -os szögtartományú konstansnak tekinthető RCS értékkel.

Mivel a háromszög CR reflektor rendelkezik a legnagyobb irányélességi tartománnyal, ezért ennek alkalmazása a legkedvezőbb abból a szempontból, hogy a reflektor kevésbé érzékeny a műholdirányba való tájékozásra. A 3. és 4. ábra egy pentagonális (ötszögű oldalakkal álló) CR reflektorra vonatkozóan is mutatja a RCS változását a besugárzás szögének függvényében. Ez a típusú reflektor már átvezet a következő numerikus vizsgálatokhoz, ahol a háromszög reflektor lehetséges csonkításának lehetőségét vizsgáltuk meg azért, hogy a tervezett integrált pontjel minél kompaktabb legyen, megfelelően a geodinamikai és mechanikai tervezés követelményeinek.

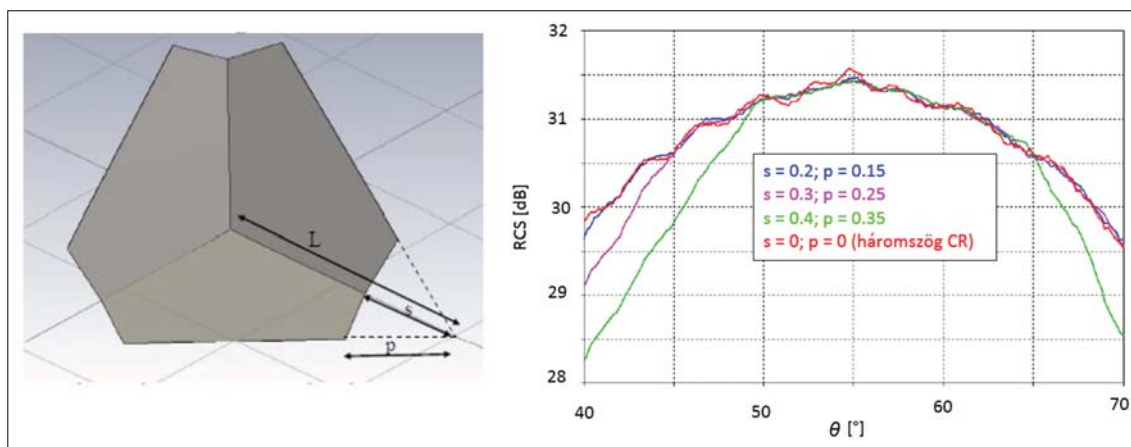
A háromszög CR reflektorok esetén 3 egyszeres, 6 kétszeres és 6 háromszoros visszaverődést adó felület mentén történhet visszaverődés. A háromszoros visszaverődések biztosítják a reflektor nagy irányélességi tartományát, ezért kedvező, ha a háromszög CR reflektornak azt a részét tartjuk meg, amely a háromszoros visszaverődéseket adja (*self brighting CR*), ezzel jutunk el a csonkított háromszög, azaz a pentagonális CR-hez. Numerikus modellezéssel megvizsgáltuk, hogy mennyire befolyásolja a reflektor sarkainak eltávolítása a RCS értékét, és mennyire változik a közel konstans RCS tartomány, tekintve, hogy döntően a háromszög CR központi része biztosítja a szóró szórási keresztmetszetet.

A 5. ábra az $a = 1$ m élhosszúságú háromszög sarokreflektor és ennek különböző mértékű, a p és s paraméterek (paraméterek magyarázatát ld. az ábrán) szerinti csonkított változatainak hatásos radarkeresztmetszetét mutatja a besugárzás szögének függvényében. A csonkolt háromszög sarokreflektor vizsgálata alapján megállapítható, hogy a csonkolás hatása $s \leq 0,3$ m és $p \leq 0,25$ m tartományon elhanyagolható, ennél nagyobb mértékű csonkítás már jelentős hatásos szórási keresztmetszet-csökkenést okoz, azonban ez a fő szórási irányban ekkor sem jelentkezik.

Az $s = (1/2)L$ és $p = (\sqrt{2}/3)L$ csonkítású reflektor (csak hármas reflexiók felületeinek megtartása) maximális RCS értéke azonos a háromszög trihedrális sarokreflektor RCS értékével. A három oldal maradékélei (az él végpontokat képzeletbeli vonallal összekötve) egy szabályos hatszög oldalainak felelnek meg, ezért hexagonális reflektornak is nevezik.

5. Integrált alappontok geodinamikai tervezése

Az integrált geodinamikai alappont tervezésénél több szempontot is figyelembe kellett vennünk:



5. ábra Csonkolt háromszög CR-ek származtatása és a reflektorok radar szórási keresztmetszete a θ besugárzási szög függvényében, $\alpha = 45^\circ$

Figure 5 Derivation of truncated triangular CR and the radar cross section of truncated triangular CRs as a function of incidence angle θ for $\alpha = 45^\circ$

1. Olyan kisméretű reflektorokat célszerű alkalmazni, amelyek ellenállnak a szélviharak által keltett torzító hatásoknak (síkfelszín és merőlegesség követelménye), de a reflektivitásuk lényegesen nagyobb legyen a háttérzajnál.
2. A reflektorok ne legyenek nagyon érzékenyek térbeli tájékozásukra, de ésszerű határok között forgathatók legyenek.
3. A le- és felszálló irányú reflektorok a lehető legközelebb legyenek egymáshoz, de a kölcsönhatásuk elhanyagolható legyen.
4. A reflektorokat vasbeton alapzaton célszerű elhelyezni, az alapzat felszíne ne legyen nagyobb 1 m^2 -nél, hasonlóan a felsőrendű gravimetriai és mérnökgeodéziai alapponthoz.
5. A reflektorok rögzítésének is ellenállónak kell lennie a szélsőséges szélnyomással szemben.
6. Az integrált alappontoknak tartalmazniuk kell olyan referencialejeleket, amelyek GNSS, mérőállomás, szintezési és gravimetriai mérésekre is alkalmasak.
7. A vasbeton alapzat esetleges dőlését időnként meg kell határozni, amit a relatív elmozdulások értelmezésénél vagy a reflektorok szükségszerű újratájékozásánál lehet felhasználni.

A 3. fejezetben bemutatott vizsgálatok alapján az 1 m élhosszúságú háromszög oldalú trihedrális reflektorok tekinthetők ideális megoldásnak. A négyzet- és negyedkör oldalú trihedrális reflektorokhoz viszonyítva stabilabbak, kisebb az anyagigényük, és kevésbé érzékenyek a tájékozási pontosságára. Ugyan a 2. és 3. táblázat alapján az RCS értékük a legkisebb, de a sík és merőlegességi követelmények megfelelő biztosításával, valamint 1-2 fok pontosságú tájékozással a 30 dB RCS érték biztosítható, amely a $\sigma_{\text{LOS}} \cong 0,3 \text{ mm}$ értéknek felel meg (1–2. feltétel).

Az integrált alappontok tervezésénél ki kell választani azokat a térben átfedő le- és felszálló irányú Sentinel-1A/B SLC felvételeket, amelyek a vizsgált területeket is lefedik és lehetőleg az IW1 és IW2 képtartományba esnek. Az IW3 esetében nagyobbak (laposabbak) a beesési szögek, és a környezet nagyobb mértékben leárnyékolhatja a reflektorokat. A pontjelek (előzetes) koordinátáiból és a felvételekhez tartozó pályaadatokból kiszámíthatók az aktuális beesési szögek ($29\text{--}46^\circ$) és a pontjel-műhold azimut-értékek. Magyarországon ezek az azimutok felszálló műhold irányban $259\text{--}260^\circ$, leszálló irányban $99\text{--}100^\circ$ fok körül változnak a földrajzi szélesség függvényében.

A szakirodalomban több összetett mechanikai rendszert fejlesztettek ki a reflektorok pontos (többnyire kalibrációs célú) tájékozáshoz (Ferretti et al. 2007, Marinkovic et al. 2008). A gyakorlati alkalmazás céljára egy viszonylag egyszerű, de robusztus rendszert terveztünk. A reflektorok földközeli lapja három, az alapzatba betonozott lábhoz kapcsolódik. A lábak hossza menetesrúd segítségével változtatható. A rúd vége arra merőlegesen kapcsolódó hengert hordoz, amely a henger tengelye mentén elforgatható lappal csatlakozik a reflektorhoz. Amennyiben a lábak pár-

huzamosak, a lábak hosszának változtatásával, a henger lába körüli és a henger tengelye menti forgatásával a három csatlakozó lap a szükséges síkba beforgatható. A rögzítő lapokhoz a reflektor síkja egy felső alátéttel és csavarral rögzíthető. Az alátét alatt kialakított rések segítségével a reflektor az átlagos (tervezett) azimuthoz viszonyítva néhány fokkal elfordítható (2. feltétel). A felszerelésnél kontracsavarokat alkalmaztunk, ami merev rendszert biztosít (5. feltétel).

Az átlagos azimut és beesési szögek miatt a háttal álló, földközeli lapokat alkalmazó reflektorok nagy alapzatot igényeltek volna. A szembefordításnál is csak akkor biztosítható az 1 m^2 vasbeton alapfelület, ha a reflektorok éle mentén, az élre merőleges 20 cm (20%) levágást terveztünk, ami még nem csökkenti jelentősen a reflektorok merevségét.

Az azonos, de 180° -kal elforgatott mechanikai rendszerrel a reflektorok háttal is elhelyezhetők, de ekkor az egyik él kerül a földközeli és két hosszabb láb egy-egy oldalhoz kapcsolódik. Ez lényegesen ronthatja a rendszer merevségét, és a kismértékű forgathatóság is nehezen biztosítható.

A legkisebb alapfelületet a hexagonális (csak hármas visszaverődésű felületek tartalmazó) reflektor alkalmazása tenné lehetővé. Mivel ekkor a lapok merevítő rudakat is igényelnek, ami a hasznos terület csökkentésével járna és a három láb elhelyezhetősége is csökkentené a rendszer stabilitását, a reflektorokat az élre merőlegesen úgy vágtuk le (33 cm , 33%), hogy tartalmazza a hármas visszaverődésű felületeket és a merevítő rudak e területen kívül essenek. A beton lapfelület ekkor 30%-kal csökkenthető.

Az analóg vizsgálatokhoz 1:5 arányú modelleket készítettünk, amelyek a kiinduló háromszög trihedrális (6. ábra 1.), a hexagonális (6. ábra 2.) és a két csonkított (6. ábra 3. és 4.) változatot tartalmazza. Az integrált alappontokból három modell készült: a 20% csonkításúval szemben és háttal álló, a 33% csonkításúval szemben álló (7. ábra) elrendezésűek.

A felszálló irányú műholdalappont azimutot 80° , a beesési szöget 45° , a leszálló irányú esetben 279° és 40° értékeknek választottuk. A lábakat és a csatlakozást nem lehetett 5-öd részére kicsinyíteni.

6. A tervezett geodinamikai alappontmodellek analóg vizsgálata

Az analóg modellezés célja a különböző típusú reflektorok reflexiós tulajdonságainak kísérleti körülmények között történő meghatározása. A mérések a BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék antennakalibráló laborjában történtek. Az analóg modellezés szabályai szerint a frekvencia n -szeresre történő növelésével, a modell mérete n -ed mértékben csökkenthető. A reflektorokat a gyakorlatban olyan anyagból készítik – döntően fém, ezen belül is alumínium – amelynek relatív dielektromos állandója (permittivitás) viszonylag nagy (alumínium: ~ 10 , beton: ~ 4.5 , bazalt: ~ 2.5), ezzel biztosítva, hogy az EM sugárzás ne hatoljon be a reflektor anyagába (kvázi „tükör-

ként” viselkedve). A skálázott kísérlet $f = 27$ GHz-es frekvencián történt, így a reflektor mérete $n = 27/5,405 = 5$ -öd részére csökkenthető. Az átskálázás következtében a reflektor anyagában nem történt változtatás, mivel az alumíniumot nagyobb vezetőképességű anyaggal (pl. arany) nem sikerült kiváltani, és a reflektort befogadó betonból készült alap helyett pyrex üveg vagy FR4 alkalmazható. Elsőként különböző módon csonkított háromszög CR-ek hatásos radarkeresztmetszetét és félteljesítményű irányélességi tartományát vizsgáltuk (6. ábra).

A hatásos szórási keresztmetszet az átskálázásnak megfelelően $1/n^2$ -edre esett vissza. A vizsgált reflektorok megközelítőleg ugyanazt a RCS értéket biztosítják. Az 1-es görbe az eredeti háromszög CR radarkeresztmetszetét mutatja, ezt legjobban a 3-as típusú csonkított reflektor RCS értéke közelíti meg. Az analóg modellkísérletnek egyik célja az volt, hogy ennek hatását megvizsgálja a szórási keresztmetszetre vonatkozóan, de ahogy az ábra mutatja, a radarkeresztmetszet nem szenved torzulást. Az analóg modellkísérletek során a vizsgált 1–4. típusú reflektorok hasonló radarkarakterisztikát mutattak, a 3. és 4. csonkítás nem okoz jelentős elvesztést.

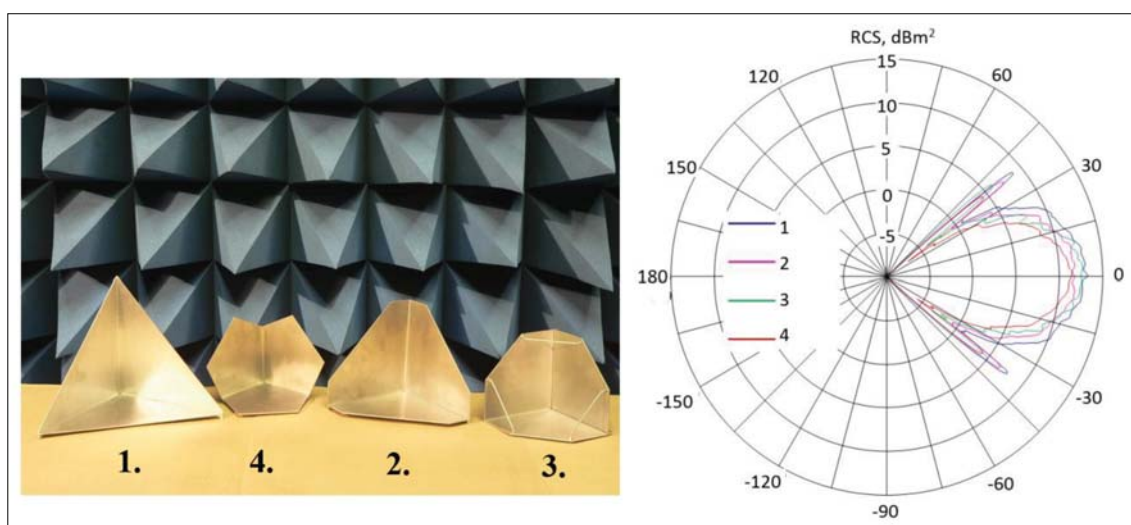
Geodéziai pontosságú deformációk meghatározásához a felszálló és a leszálló műholdirányoknak megfelelően tájékozott reflektorpár alkalmazása szükséges. Az analóg modellezés során megvizsgáltuk az egymással szemben, valamint háttal álló ikerreflektorok egymásra gyakorolt reflexiómódosító hatásait is. A 6. ábra alapján megállapítható, hogy a három vizsgált elrendezésre vonatkozóan nem mutatható ki számottevő eltérés a reflektorok hatásos keresztmetszetében. A le- és felszálló irányú eltérő azimut és beesési szögek okozta aszimmetria azonban jól felismerhető, amely a maximális visszaverődés irányától néhány fokos eltérés esetében is elhanyagolható.

A műholdradar-interferometria szempontjából a reflektorok okozta kölcsönös fáziszaj és a fáziscentrum különpontossága (a reflektorok sarokpontjától való eltérés) jóval fontosabb tényező. A különpontosságot numerikus modellezéssel határoztuk meg. A 7.a ábrán látható elrendezésnél a különpontosság az alapzathoz közeli él mentén $+1.7$ mm, a közel függőleges él mentén $+0.6$ mm. A 7.b ábrán látható elrendezésnél csak az alapzathoz közeli él mentén jelentkezett $+1.4$ mm különpontosság. Mivel a műholdradar-interferometria két időpont és két pont közötti műholdirányú relatív elmozdulást tud meghatározni, ez a különpontosság az adatfeldolgozás során két reflektor között gyakorlatilag kiesik (szükség esetén kiszámítható).

7. Gyakorlati alkalmazások rövid bemutatása

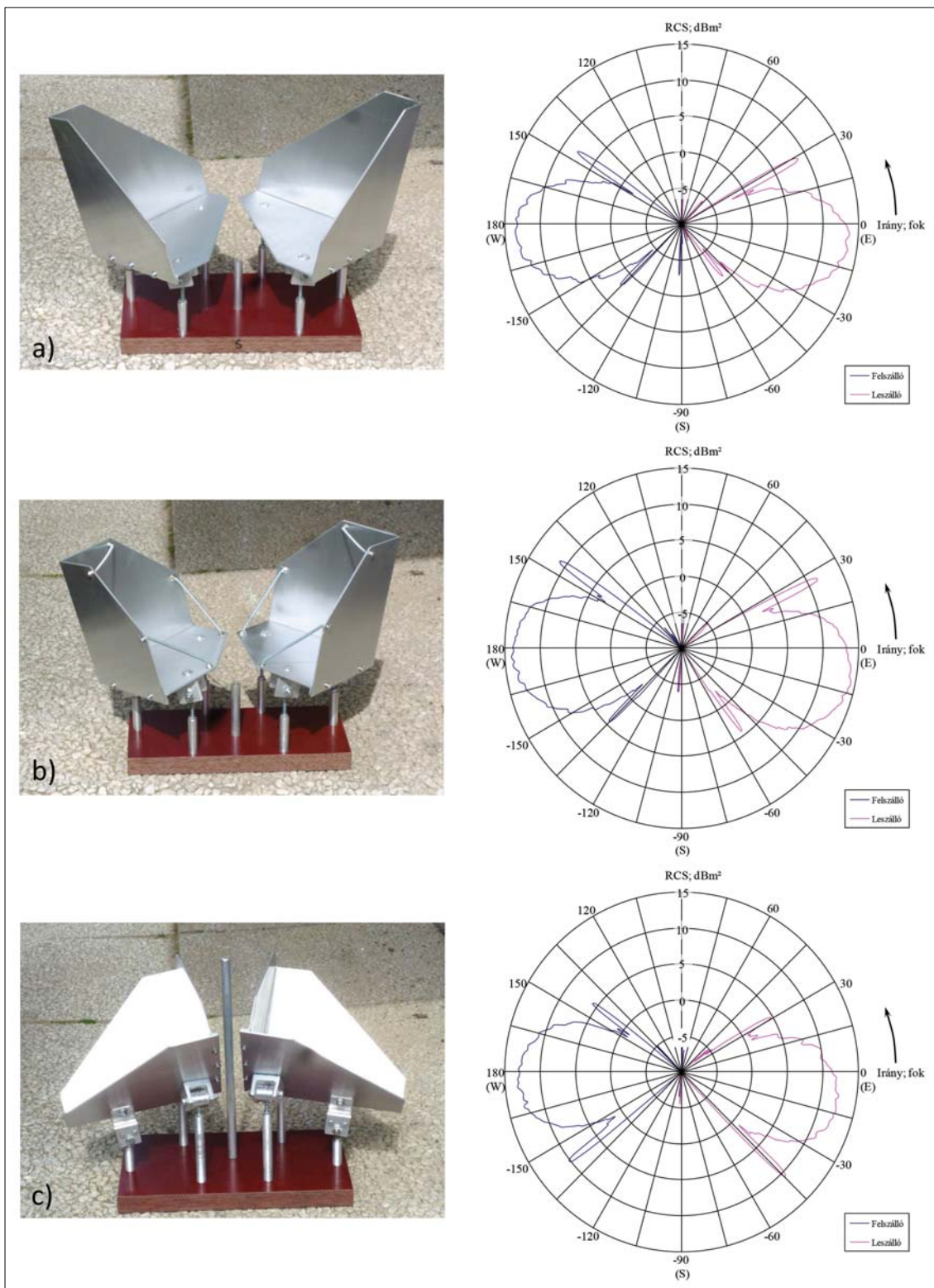
A fenti vizsgálatok eredményeinek figyelembe vételével, valamint további metodológiai vizsgálatokhoz különböző típusú reflektorok és elrendezések felhasználásával az ország több, geodinamikailag aktív területén (pl. Kulcs, Dunaszekcső, Fonyód) integrált hálózatot létesítettünk. A geodéziai referenciapontok (GR) koordinátáit időszakonként GNSS méréssel meghatározzuk, és megmérjük az elméleti fáziscentrumok és dőlésmérési pontok GR-hez viszonyított relatív helyzetét is.

A Sopron környéki hálózatunkat módszertani vizsgálatokra terveztük, három 20% csonkítású, szemben álló és egy háttal álló elrendezést építettünk meg. A valós reflektivitások vizsgálata kedvező eredményeket mutatott, és igazolta az előzetes elvárásokat. Ezt követően a fonyódi hálózatnál 3 db, a dunaszekcsőinél 4 db 20% csonkítású, egymással szemben álló, majd Kulcson 5 db 33% csonkítású, szemben álló alappontot telepítettünk.



6. ábra Az ábrán látható 4 különféle háromszög sarokreflektor poláris RCS ábrája az α azimut függvényében, a besugárzás szöge $\theta = 55^\circ$

Figure 6 Polar plot of the radar cross section of the 4 different type of triangular CR depicted on the figure on the left as a function of azimuth α for incidence angle $\theta = 55^\circ$

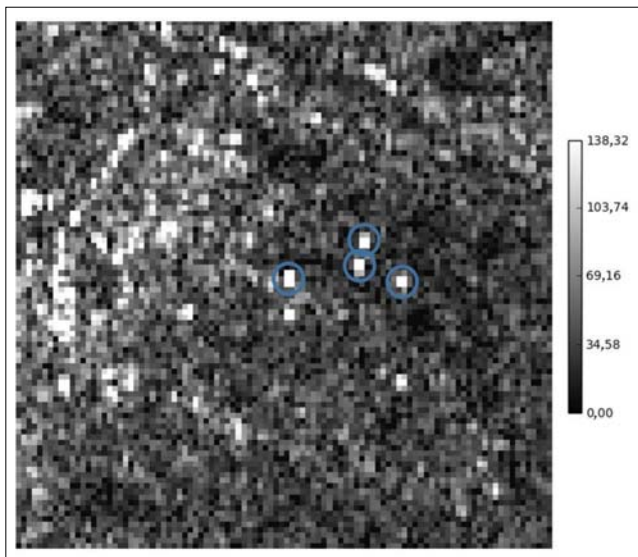


7. ábra Különböző elrendezésű és csonkítású ikerreflektorok hatásos radarkeresztmetszete a laboratóriumi mérések alapján. a) Szemben álló 20% csonkítású alappont és RCS görbéje. b) Háttal álló 20% csonkítású alappont és RCS görbéje. c) Szemben álló 33% csonkítású alappont és RCS görbéje

Figure 7 Radar cross section of twin reflectors with various amount of truncation and with different arrangements based on analogue experiments. a) Face to face arrangement with 20% truncation and its RCS curve. b) Back to back arrangement with 20% truncation and its RCS. c) Face to face arrangement with 33% of truncation and its RCS

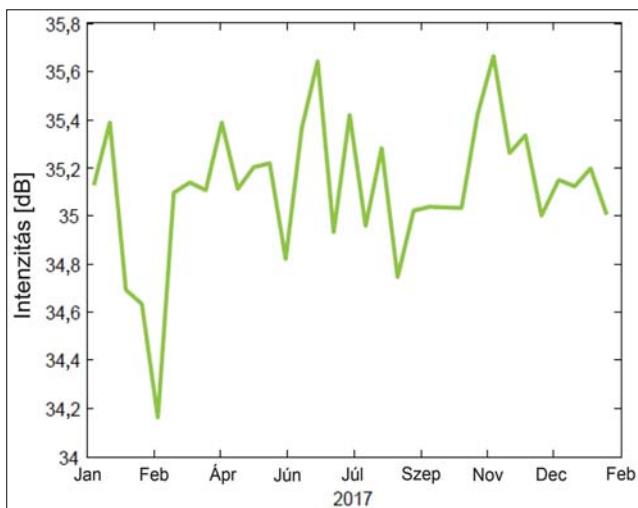
Az EM méretezés gyakorlati ellenőrzését a dunaszekcsői hálózat pontjainak (8. ábra) vizsgálata alapján foglaljuk

össze röviden. A hálózat 4 pontból áll, melyekből hármát a mozgó löszblokkokra telepítettünk, a negyedik pont fix-



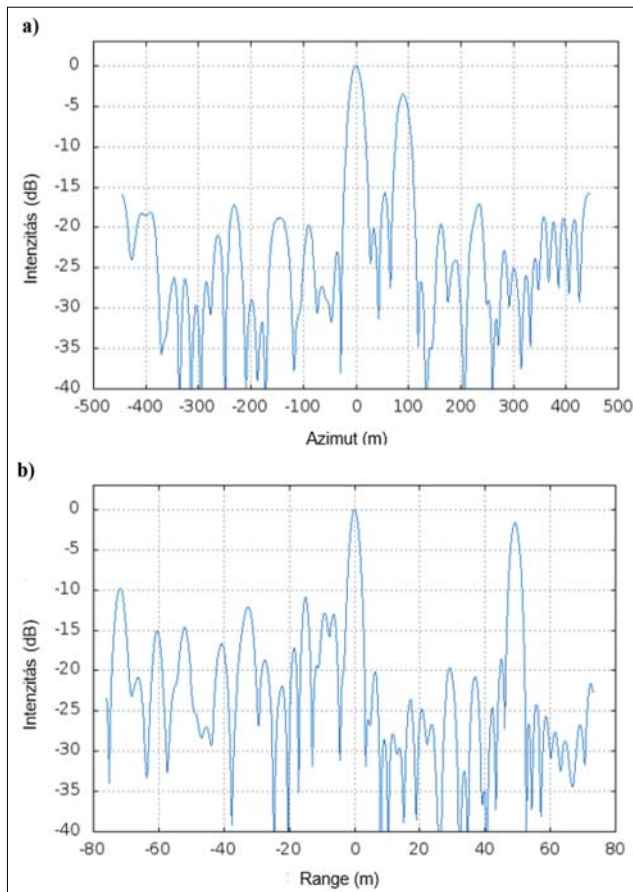
8. ábra A 4 pontból álló dunaszekcsői mozgásvizsgáló hálózat pontjai (körökkel jelölve) a 175-ös relatív pályaszámú, 2017.01.10. dátumú S1-A felvétélből meghatározott korrigált intenzitás felvételen. A kivágat 100 × 100 pixel nagyságú területet fed le, a hálózat fix pontja (bal oldali pont) a kivágat közepén található, pixelméret 2,33 m × 13,94 m *range* és azimut irányban a ránézés síkjában, a beesési szög 33,7605°. A skála az intenzitás értékek nagy dinamikája miatt nem lineáris, a nagy intenzitás értékek a megjelölt tartományra vannak leképezve

Figure 8 The 4 benchmarks of the Dunaszekcső landslide network (marked by circles) of the Sentinel-1A corrected intensity image of relative orbit 175 and acquisition date 10 October 2017. The figure shows a 100 pixel by 100 pixel area of the scene centred at the fix benchmark of the network (the one on the left-hand side), pixel size 2.33 m × 13.94 m in slant range and azimuth direction, incidence angle is 33.7605°. Grayscale is not linear due to the dynamic range of intensities, but imaged to the indicated range



10. ábra A dunaszekcsői hálózat fix reflektorának intenzitás változása 2017 során. Az intenzitás értékek S1A felvételek alapján kerültek meghatározásra (relatív pályaszám: 175, IW1 sáv, beesési szög ~33°)

Figure 10 Intensity values of the fix benchmark of the Dunaszekcső landslide network during 2017. Intensity values were determined from S1A scenes (relative orbit: 175, swath: IW1, incidence angle ~33°)



9. ábra A dunaszekcsői hálózat fix reflektorának relatív intenzitásértéke (dB) a közeli környezethez képest

Figure 9 Relative intensity value (in dB) of the fix benchmark of the Dunaszekcső landslide network compared to the intensity of its direct vicinity

pontként szolgál, amelynek fázisváltozásához képest vizsgálható a másik három pont fázisváltozása, így az esetlegesen bekövetkezett deformációk. A hálózat kis kiterjedése biztosítja, hogy a léghör EM hullámterjedésre gyakorolt terjedési sebességmódosító hatása közel azonos valamennyi pont esetében.

A telepített mesterséges szórópontok reflexiók tulajdonságainak vizsgálatát a hálózat fixpontja alapján ismertetjük, a többi integrált geodinamikai alappont esetében is hasonló reflexiók eredmények adódnak. A 9. ábra a vizsgált pont környezetének intenzitásértékeit mutatja dB-ben a sarokreflektor intenzitásértékéhez viszonyítva azimut és *range* irányú metszetekben. Az ábra jól mutatja, hogy a telepített mesterséges szórópont reflexiók szempontból jól kiemelkedik környezetéből. A háttér reflexió $-20 \div -30$ dB között változik, az ábrákon látható további csúcsok egy közeli (90 m-re levő) épület hatását (9.a ábra esetében), illetve *range* irányban a megközelítőleg 50 m-re található 2-es számú reflektort mutatják (9.b ábra). A telepített reflektor nemcsak az adott felbontási cella fázisát dominálja (*main lobe*), hanem a környező cellákat is (*side lobe*). A -3 dB-es irányélességi tartomány *range* irányban 1,159 pixel (2,701 m), azimut irányban pedig 1,603 pixel (22,343 m),

azaz *range* irányban csak az adott pixelt dominálja a reflektor, a műhold haladási iránya esetén pedig a környező pixeleket is. Alkalmasan választott algoritmussal, a reflektor helye pixel alatti pontossággal meghatározható.

Az integrált geodinamikai pontjel intenzitásértékének stabilitását mutatja a 10. ábra. A teljes vizsgált időszakban teljesítette a reflexió követelményeket a telepített sarokreflektor. A visszavert jel intenzitásának ingadozása 1 dB-en belül marad, ezzel biztosítva a felbontási cella fázisstabilitását, ami a nagy pontosságú deformáció meghatározásának alapfeltétele.

8. Összefoglalás

A Sentinel-1 SAR műholdrendszer fontosabb paramétereinek ismertetése után bemutattuk a különböző sarokreflektor-típusok analitikus modellezését és tulajdonságait. A céljainknak leginkább megfelelő 1 m élhosszúságú modellt választottuk ki, amely 31,3 dBm² effektív keresztmetszettel rendelkezik és a -10 dB háttérzaj esetében is biztosítani tudja a LOS fázisértékek megközelítőleg 0,3 mm pontosságú meghatározását. Numerikus módszerrel megvizsgáltuk a reflektor csonkításának lehetőségeit. Ezt követően definiáltuk a le- és felszálló irányú reflektorokat hordozó és GNSS mérésre is alkalmas integrált alappontokkal kapcsolatos elvárásokat. Az integrált alappontok reflektorainak kölcsönhatását 1:5 arányú modellek segítségével visszhangmentes antennakalibráló laboratóriumban vizsgáltuk, amely kedvező eredményeket szolgáltatott.

A gyakorlatban négy hálózatot építettünk ki: egyet a rendszer tesztelésére és az EM jelterjedést befolyásoló tényezők vizsgálatára, hármát pedig aktív földcsuszamlásos területek megfigyelésére. A Széchenyi István Geofizikai Observatórium környezetében telepített, deformációmentes hálózaton a rendelkezésre álló további geofizikai mérések (meteorológiai, 4D-s ionoszféramonitoring, GNSS állomás) lehetőséget teremtenek az atmoszférikus hatások összetett vizsgálatára.

Két GNSS mérés közötti SAR felvételek integrált feldolgozására kidolgozott eljárás és programrendszer fejlesztése jelenleg is folyamatban van. A teszterületeken végzett meghatározott deformációvizsgálat tapasztalatairól, eredményeiről a közeljövőben egy külön tanulmányban számolunk be.

Köszönetnyilvánítás

Ez a tanulmány az ESA ESTEC Contract No. 4000118850/16/NL/SC számú pályázat támogatásával készült. A tanulmány módosított Copernicus Sentinel adatot tartalmaz (Contains modified Copernicus Sentinel data [2017]).

A tanulmány szerzői

Bányai László, Nagy Lajos, Bozsó István, Szűcs Eszter, Wesztergom Viktor

Hivatkozások

- Adam N., Kampes B., Eineder M. (2004): Development of a scientific permanent scatterers system: Modifications for mixed ERS/ENVISAT time series. Paper presented at Envisat and ERSSymposium, European Space Agency, Salzburg, Austria, 6–10 September 2004.
- Bányai L., Szűcs E., Wesztergom V. (2017): Geometric features of LOS data derived by SAR PSI technologies and the three-dimensional data fusion. *Acta Geod. et Geoph.*, 52/3, 421–431.
- Bányai L., Szűcs E., Kalmár J., Eperné P. I., Bán D. (2014): Az InSAR technológia alapjai és a reflektáló felületek jellemzői. *Geomatikai Közlemények*, 17, 59–68.
- Brooker G. (2009): Target and Clutter Characteristics. In: Introduction to Sensors for Ranging and Imaging. Institution of Engineering and Technology, pp. 299–356. doi: 10.1049/SBRA014E_ch8.
- Elliott J. R., Walters R. J., Wright T. J. (2016): The role of space-based observation in understanding and responding to active tectonics and earthquakes. *Nature Communications* 7, 13844, doi: 10.1038/ncomms13844.
- Ferretti A., Savio G., Barzaghi R., Borghi A., Musazzi S., Novali F., Prati C., Rocca F., (2007): Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45, 1142–1153. doi: 10.1109/TGRS.2007.894440.
- Ferretti A. (2014): Satellite InSAR data. EAGE Publications bv., p. 159.
- Garthwaite M. C., Thankappan M., Williams M. L., Nancarrow S., Hislop A., Dawson J. (2013): Corner reflectors for the Australian Geophysical Observing System and support for calibration of satellite-borne synthetic aperture radars. 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium – IGARSS, 21–26 July 2013, doi: 10.1109/IGARSS.2013.6721143.
- Garthwaite M. C., Nancarrow S., Hislop A., Thankappan M., Dawson J. H., Lawrie S. (2015): The design of radar corner reflectors for the Australian Geophysical Observing System: a single design suitable for InSAR deformation monitoring and SAR calibration at multiple microwave frequency bands. Technical report, Record 2015/03, GeoCat 82751. The doi: 10.11636/Record.2015.003, pp. 1–85.
- Garthwaite M. C. (2017): On the design of radar corner reflectors for deformation monitoring in multi-frequency InSAR. *Remote Sens.*, 9/7, 648, doi: 10.3390/rs9070648.
- Garthwaite M. C. (2018): Correction: On the design of radar corner reflectors for deformation monitoring in multi-frequency InSAR. *Remote Sens.*, 10(1), 86; doi: 10.3390/rs10010086
- González P. J., Bagnardi M., Hooper A. J., Larsen Y., Marinkovic P., Samsonov S. V., Wright T. J. (2015): The 2014–2015 eruption of Fogo volcano: Geodetic modeling of Sentinel-1 TOPS interferometry. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 9239–9246, doi: 10.1002/2015GL066003.
- Hanssen R. (2001) Radar Interferometry: Data interpretation and error analysis. Springer Science & Business Media.
- Li Z., Wright T., Hooper A., Crippa P., Gonzalez P., Walters R., Elliott J., Ebmeier S., Hatton E., Parsons B. (2016): Towards InSAR everywhere, all the time, with Sentinel-1. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 763–766. doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B4-763-2016
- Marinkovic P., Ketelaar G., Van Leijen F., Hanssen R. (2008): InSAR quality control: Analysis of five years of corner reflector

- time series. In: European Space Agency, (Special Publication) ESA SP: 649 SP
- Parker A. L., Featherstone W. E., Penna N. T., Filmer M. S., Garthwaite M. C. (2017): Practical considerations before installing ground-based geodetic infrastructure for integrated InSAR and cGNSS monitoring of vertical land motion. *Sensors (Switzerland)*, 17/8, 1753. doi: 10.3390/s17081753.
- Polycarpou A. C., Balanis C., Tirkas P. (1995): Radar cross section of trihedral corner reflectors: theory and experiment. *Electromagnetics* 15, 457–484, doi: 10.1080/02726349508908436.
- Rosen P. A., Hensley S., Joughin I. R., Li F. K., Madsen S. N., Rodriguez E., Goldstein R. M. (2000): Synthetic aperture radar interferometry. *Proc. IEEE*, 88/3, 333–382.
- Sarabandi K., Tsen-Chieh C. (1996): Optimum corner reflectors for calibration of imaging radars. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 44/10, 1348–1361.
- Sentinel-1 User Handbook, https://sentinel.esa.int/documents/247904/685163/Sentinel-1_User_Handbook, hozzáférés dátuma: 2018. március 27.
- Zink M., Kietzmann H. (1995): Next Generation SAR – External Calibration Rep. 95–41, 45 p., German Aerospace Center (DLR).