ÉVFOLYAM
Volume

XXVI

2023

GEOMATIKAI KÖZLEMÉNYEK

Publications in Geomatics

FŐSZERKESZTŐ
Editor in Chief

PAPP G

TANÁCSADÓ TESTÜLET
Advisory board

ÁDÁM J *(elnök/chair)*
BIRÓ P
BOZÓ L
MÁRTON P

HU ISSN 1419-6492

FÖLDFIZIKAI ÉS ŰRTUDOMÁNYI KUTATÓINTÉZET
SOPRON

Geomatikai Közlemények

Publications in Geomatics

kiadja a

HUN-REN FÖLDFIZIKAI ÉS ŰRTUDOMÁNYI KUTATÓINTÉZET

9400 Sopron, Csatkai E. u. 6-8.
tel.: +3699 508 364

e-mail: geomatika@epss.hun-ren.hu

web: https://geomatika.epss.hu/
web programozó: Lovranits Tamás

felelős kiadó:
Kovács István János
igazgató

főszerkesztő:
Papp Gábor

angol nyelvi szerkesztő:
Papp Gábor

technikai szerkesztő:
Szlávy Anna

készült a

LŐVÉR PRINT Kft. nyomdájában
9400 Sopron, Ady Endre u. 5.
tel.: +3699 329 977

megjelent 60 példányban

Sopron, 2023

HU ISSN 1419-6492

GEOMATIKAI KÖZLEMÉNYEK XXVI.

„Minden nemzet a maga
nyelvén lett tudós,
de idegenen sohasem.”

(Bessenyei György)

ÁLTALÁNOS INFORMÁCIÓK ÉS ÚTMUTATÓ

A Geomatikai Közlemények 1998 óta rendszeresen, általában évenként egy alkalommal megjelenő folyóirat. A kiadvány célja, hogy elsősorban magyar és esetenként angol nyelvű fórumot biztosítson azon hazai, ill. külföldi kutatóknak és szakembereknek, akik a geodézia, fotogrammetria, térinformatika, fizikai geodézia, geofizika, földmágnesség, geodinamika, a Föld belső szerkezete és a Föld körüli térség fizikája, tágabb értelemben véve a földtudományok területén elért tudományos eredményeiket szeretnék közzétenni. A kiadványban megjelenő cikkek és tanulmányok a mai normáknak megfelelő lektorálási folyamaton mennek keresztül, azaz mielőtt publikálásra kerülnek legalább két független bíráló véleményt alkot a közlésre benyújtott kéziratról. A bírálók nevét alaphelyzetben csak a szerkesztőbizottság ismeri, de a bírálók kérhetik anonimitásuk felfüggesztését. A bírálatok alapján a bizottság eldönti, hogy az adott kézirat megfelel-e a Geomatikai Közlemények formai és tartalmi követelmény-rendszerének, illetve, hogy az esetlegesen felmerülő hibák és hiányosságok kijavíthatók- és pótolhatók-e a kézirat kisebb-nagyobb átdolgozásával. A szerkesztőbizottság szakmai munkáját egy Tanácsadó Testület segíti.

A Geomatikai Közlemények szerkesztését, amelyet 2011-től már egy az interneten keresztül elérhető és működtethető web felület is támogat (https://www.geomatika.epss.hu/kozlemenyek ©Lovranits Tamás és Papp Gábor), társadalmi munkában végző szerkesztőség nagy hangsúlyt fektet a lehető leggyorsabb minőségi munkára. Ez mind a szerzőktől, mind a bírálóktól erőfeszítéseket és fegyelmet kíván, amit a szerkesztőség előre is tisztelettel megköszön. Ennek biztosításához javasoljuk áttanulmányozni a következő anyagokat:

Geomatikai_Közlemények_instrukciók_szerzőknek.doc,
Geomatikai_Közlemények_instrukciók_bírálóknak.pdf,

amelyek a már fent megadott címre belépve a megfelelő linkeken keresztül letölthetők. A regisztrált felhasználók ugyanezen a felületen keresztül végezhetik el a rendszer által koordinált aktuális feladataikat akár szerzői akár bírálói szerepkörben. Az új felhasználók ugyanitt regisztrálhatnak, felhasználói név és e-mail cím megadásával.

A feltöltött kéziratokat a szerkesztőség egy tagja, a kézirathoz rendelt felelős szerkesztő előbírálja, elsősorban az instrukciókban megfogalmazott formai szempontok szerint. Ha a kézirat formailag kielégítőnek bizonyul, akkor elindul a bírálati folyamat, amely általában több ciklust is képez és egészen addig tart, ameddig a bírálók, ill. a felelős szerkesztő ezt tartalmi-formai indokok miatt szükségesnek tartják. A bírálati fázisokról és az aktuális teendőkről mind a szerzők mind a bírálók automatikus üzenetekben értesülnek.

A Geomatikai Közleményeket a HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet adja ki. Jelen kötet kiadásának anyagi hátterét egyrészt a FI másrészt a Soproni Tudós Társaság támogatásai tették lehetővé.

A Geomatikai Közlemények jelen kötetének felelős szerkesztői:
Benedek Judit, Papp Gábor.

ELŐSZÓ

A Geomatikai Közlemények ezen kötete két tudományos cikk mellett helyet adott egy PhD disszertáció utánnyomásának is. Bozsó István 2024. április 18-án sikerrel védte meg dolgozatát, amelyet Dr Rózsa Szabolcs az MTA Doktora és Dr. Molnár Gábor PhD bíráltak és amelynek digitális változata elérhető itt:
DOI: 10.15476/ELTE.2023.105.

A KÖTETBEN MEGJELENT CIKKEK BÍRÁLÓI

Jancsó Tamás
Czajlik Zoltán
Rupnik László
Busics György
Bazsó Tamás

TARTALOMJEGYZÉK

Contents

Juhász Attila, Schlosser Aletta 7
Modern kori katonai objektumok rekonstrukciójának térinformatikai lehetőségei
GIS for the reconstruction of modern age military object

Orbán Aladár, Kalmár János, Gribovszki Katalin 23
A forgólézeres szintkitűzők vizsgálatáról
About the examination of the rotary laser level equipment

Bozsó István 33
Műholdradar interferometria és GNSS mérések kombinálása 3D-s deformációk meghatározása - doktori értekezés
Combination of satellite radarinterferometry and GNSS measurements to determine 3D deformations

Benyújtva: 2022.11.03 *Közlésre elfogadva: 2023.05.15*

MODERN KORI KATONAI OBJEKTUMOK REKONSTRUKCIÓJÁNAK TÉRINFORMATIKAI LEHETŐSÉGEI

Juhász Attila[*], *Schlosser Aletta*[**]

GIS for the reconstruction of modern age military objects – *Modern remote sensing technologies, such as laser scanning and the use of drones, which have become increasingly widespread in recent decades, play a significant role in modern age military object reconstruction. Reconstructions, which are traditionally based on archive data sources, can be very effectively complemented by these new data acquisition techniques. The acquired high-density, accurate and reliable data can support not only the strategic-level analyses but also the local and tactical level examinations, for which precise knowledge of the position and orientation of the investigated objects is essential. In this article, the authors review the possibilities of using the available GIS data sources in military object reconstruction, based on their own previous and latest research and on results published in Hungary and abroad.*

Keywords: GIS, remote sensing, LiDAR, UAV, object reconstruction, archive data sources

Az utóbbi évtizedekben egyre szélesebb körben elterjedő modern távérzékelési technológiák, mint a lézerszkennelés és a drónok használata, a katonai objektum rekonstrukciók végrehajtásában is döntő szerephez jutottak. A tradicionálisan archív alapanyagok használatát megkövetelő rekonstrukciókat nagyon hatékonyan egészítik ki az új adatgyűjtési eljárások. Az ezekből nyerhető nagy sűrűségű, pontosságú és megbízhatóságú adatok segítségével már nem csak a stratégiai szintű elemzések, hanem a lokális taktikai szintű vizsgálatok is kivitelezhetők, melyekhez elengedhetetlenül fontos a vizsgált objektumok pozíciójának és irányultságának pontos ismerete. A cikkben a szerzők a rendelkezésre álló térinformatikai adatforrások felhasználásnak lehetőségeit tekintik át, saját korábbi és új eredményeik, valamint a hazai és külföldi kutatások alapján.

Kulcsszavak: térinformatika, távérzékelés, LiDAR, UAV, objektum rekonstrukció, archív adatforrások

1 Bevezetés

A modern kori katonai események és a hozzájuk tartozó objektumok vizsgálata, rekonstrukciója komoly múltra tekint vissza, annak ellenére, hogy például Magyarországon a tradicionális régészet csak az 1711. előtti korszakokra fókuszál. A XX. század háborús események és kapcsolódó védelmi rendszerek kutatása és bemutatása folyamatosan nagy érdeklődésre tart számot. A hadtörténeti publikációk - habár sok térképi mellékletet tartalmaznak - inkább az események bemutatására koncentrálnak, mint az érintett védelmi rendszerek és azok objektumainak ismertetésére. A korszerű távérzékelési és térinformatikai eljárások lehetőséget biztosítanak számunkra egy mérnöki szemléletű, objektív megközelítésre, különböző rekonstrukciók végrehajtására, amelyekkel közvetlenül támogathatjuk a hadtörténészek munkáját és realisztikusabbá tehetjük a téma iránt érdeklődők élményét. Emellett támogatni tudjuk a fel nem robbant bombák detektálásának folyamatát is.

Az I. világháború után döntően állandó jellegű vasbeton erődítések készültek szerte Európában, majd a későbbi tapasztalok alapján a hevenyészett föld-fa erődítések építése került előtérbe. A beton építmények ennek ellenére a későbbiekben is jelen voltak a védelmi rendszerekben. Magyarország tekintetében két időszakot emelünk ki, amikor jelentős védelmi rendszereket építettek. A II. világháborúban, amikor a szovjet csapatok elérték az országot, az eredetileg a Keleti-Kárpátokban kiépített

Geomatikai Közlemények Publications in Geomatics

[*]*BME Fotogrammetria és Térinformatika Tsz.*
Budapest, Műegyetem rkp. 3, juhasz.attila@emk.bme.hu
[**]*DE Természetföldrajzi és Geoinformatikai Tsz.*
Debrecen, Egyetem tér 1. schlosser.aletta@science.unideb.hu

Árpád-vonal részben elveszítette jelentőségét a román kiugrás miatt. A dél-keleti irányból érkező támadást a Karola-, Attila- és Margit-vonalakkal tervezte a magyar és német hadvezetés megállítani (Juhász 2004). A világháború után a hidegháborús korszak derekán az akkori Jugoszláviával közös határ megerősítését tűzte ki célul a magyar és szovjet vezetés. Óriási ráfordításokkal kezdték el építeni a Déli Védelmi Rendszert (DVR) (pl. az akkori GDP negyedét erre költötték), amely a tervek szerint 7687 darab tüzelőállást (harckocsi, rohamlöveg, tüzérségi, aknavető, géppuska), 2000 harcálláspontot és figyelő helyet, 2469 darab kizsaluzott óvóhelyet, 964 darab vasbetonból készült géppuska-kupolát, 219 darab tüzérségi erődöt, 4158 kilométernyi harc- és közlekedőárkot, valamint több mint 120 darab tankfedezéket tartalmazott volna a körül-belül 600 kilométeres közös határ mentén. Ennek 40%-a készült el 1955-re, amikor is a bekövetkezett politikai változásoknak köszönhetően befejezték a további munkálatokat (Suba et al. 2010). Mindkét korszak katonai objektumainak nyomait megtalálhatjuk a mai napig is.

Ezeknek a védelmi rendszereknek a rekonstrukciója jó esetben két szinten is megvalósítható, jól elkülöníthető méretaránnyal és részletességgel (Level Of Details, LOD). Első közelítésben a teljes rendszert érdemes vizsgálni, komplexen a hadműveleti szinten, a stratégiai megfontolásokat szem előtt tartva, kisebb méretarányoknak megfelelő pontossággal és adatsűrűséggel. Itt kell megjegyezni, hogy az erődítési rendszerekhez kapcsolódóan érdemes a bombakráterek detektálásával is foglalkozni. A két dolog szoros összefüggésben lehet, hiszen mind légi bombázás, mind tüzérségi tűz érhette a vonalakat, így a kráterek jelenléte erődítési elemre is utalhat. Emellett a bombakráterek elemzésének biztonsági jelentősége is van, az erődítésektől függetlenül. Légi bombázásokkal a katonai objektumokon kívül a kritikus infrastruktúrát is támadták, így ezek földrajzi értelemben elkülöníthetők. A fel nem robbant bombák valós veszélyt jelentenek még napjainkban is. A szakirodalom szerint a 10-15 százaléka a ledobott bombáknak nem robbant fel (Szikszai 2017).

Másodsorban pedig kisebb csataterek (pl. század védőkörlet) vizsgálata szükséges, a részletes és pontos védelmi taktika rekonstruálásához, ami nagy méretarányú feldolgozást igényel. Míg az előbbi esetben a nagyobb távolságból végrehajtott hagyományos távérzékelési eljárások is elégségesek, addig a másodikban már szükségünk van a vizsgált objektumok pontos helyzetére és irányultságára is. Például egy század-, vagy szakaszparancsnoki figyelőhely kémlelő nyílásának iránya lefedte azt a területet, amelyet az adott egység felügyelt és tűz alatt tartott. Az ilyen részletességű rekonstrukciók korábban sok esetben igen körülményesen zajlottak terepen, azonban az utóbbi években megjelent korszerű adatgyűjtési eljárások (LiDAR, UAV) óriási előrelépést jelentettek ezen a téren is. Mivel jellemzően a ma is fellelhető objektumok részben vagy teljes egészében növényzettel fedettek, a különböző lézerszkennelési megoldások nagyon hatékonyak a rekonstrukciókban. Emellett természetesen a fotogrammetriai megoldásoknak is van létjogosultsága ezekben a kutatásokban, akár önállóan, akár a szkennelt adatokkal integráltan.

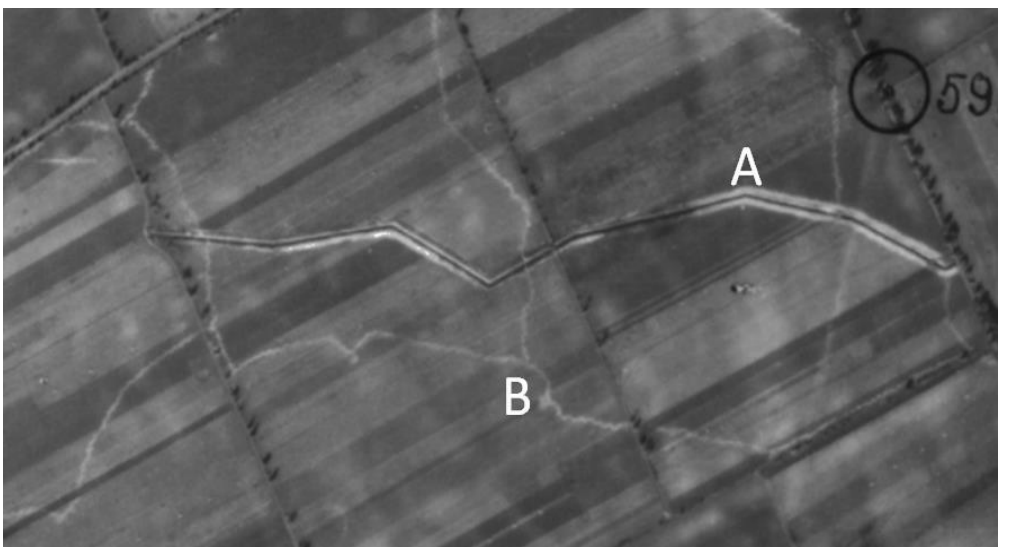
A célunk a jelenleg rendelkezésre álló releváns adatforrások áttekintése és vizsgálata, valamint az önálló vagy adatfúzió alapú feldolgozási módszerek ismertetése ennek a speciális rekonstrukciós feladatnak a szemszögéből. A saját munkák bemutatása mellett igyekeztünk több hazai és külföldi kutatási eredményt is felhasználni a katonai objektum rekonstrukciók térinformatikai keretek közötti végrehajtásának áttekintésére.

2 A katonai objektum rekonstrukció adatforrásai és feldolgozási módszerei

Mint azt már a korábbiakban említettük, a hadtörténeti jellegű vizsgálatok alapjául döntően archív, illetve korabeli források szolgálnak. Jelen esetben ezeket az adatgyűjtési eljárásokat és a belőlük levezetett eredményeket külön tárgyaljuk több okból is. Először is minőségi szempontból és információ tartalom tekintetében nagyon eltérőek a maiaktól, ami döntően meghatározza a használhatóságukat is. Archív alatt ez esetben azokat a forrásokat értjük, amelyek időben a lehető legközelebb készültek a vizsgált eseményekhez, objektumokhoz. Korábbi publikációkban már több példán keresztül is bemutattuk ezeknek forrásoknak a felhasználási lehetőségeit térinformatikai keretek között (Juhász 2004), így most csak egy nagyon rövid összefoglalásban térünk ki rájuk az alábbiakban. Általánosságban elmondhatjuk, hogy ezen források legfőbb előnye a korabeli állapotok rögzítésében rejlik, ami nélkülözhetetlen a rekonstrukciókhoz annak ellenére, hogy a minőségük a legtöbb esetben igen rossz.

2.1 Archív adatforrások

Az archív adatforrásokat a belőlük nyerhető adatok objektivitása szerinti sorrendben tárgyaljuk. Ez azért is szükséges, mert alapvetően mérnöki szemléletű, objektív megközelítés az, amivel az adott események, objektumok rekonstrukcióját végre kell hajtani. Az 1950-es években készített magyarországi légifényképezési kampányok légifotói a legértékesebb alapanyagot jelentik. Sokszor igen rossz minőségük ellenére jól azonosíthatóak rajtuk a különböző katonai objektumok, akár a legkisebb méretű lövészárkokig bezárólag. Míg korábban nagyon fáradságos munkát jelentett a feldolgozásuk, ma már akár georeferált formában is letölthetők és használhatók erre a célra is. Segítségükkel nem csak a jelentős méretű harckocsi árkok, bombakráterek, hanem a kisebb lövészárkok (szerencsés esetben akár betemetett állapotban is), illetve a különböző állások, építmények is beazonosíthatók, térképezhetők (1. ábra).



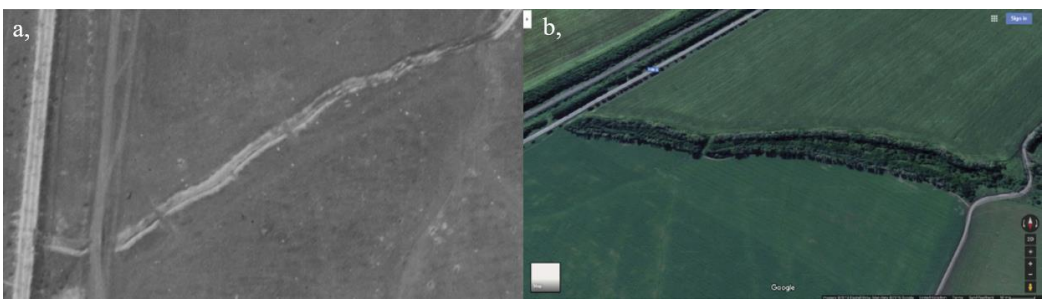
1. ábra. Harckocsi (A)- és lövészárok (B) archív légi felvételen (Juhász és Winkler 2013)

A következő forrást a háború alatt használt hadműveleti térképek, valamint a későbbi években készített topográfiai térképek jelentik. Különösen a nagyobb méretarányú (M=1:10000) térképművek vizsgálata hozhat eredményeket a rekonstrukció során, mert ezeken van esély az objektumok vagy azok nyomainak a kiértékelésére, pozíciójának, funkciójának meghatározására vagy éppen a bombakráterek térképezésére. A térképi adatok csak kiindulási információként szolgálhatnak, amit vagy fényképi vagy terepi adatokkal kell teljessé tennünk, de sok esetben megkönnyítik a releváns területek kiválasztását. A már korábban is említett nagyszámú hadtörténeti publikáció és egyéb írásos források felhasználása jelenti a következő lépést. Ez esetben azonban mindig élnünk kell a forráskritikával, legyen szó publikációról vagy éppen levéltári adatokról. A hadi jelentéseket általában „kozmetikázzák" a harcoló felek, így az ezeken alapuló hadtörténeti publikációk is tartalmazhatnak nem megbízható információkat. Ennek ellenére - illetve a védelmi rendszerek jellemzően ritka említésének mellett - igen hasznos források ezek a művek is. A térinformatikai rekonstrukciók potenciális felhasználói maguk a hadtörténészek lehetnek, akik mindig nyitottak a térképi alapú megjelenítésekre. Meg kell említeni egy olyan forrást, ami az évek múlásával egyre inkább jelentőségét veszti. A szóbeli visszaemlékezésekről van szó, amelyekben a résztvevők, szemtanúk beszámolóit hallgathatjuk meg a vizsgált eseményekkel, területekkel kapcsolatosan, fokozott kritikai szemlélettel. Habár az idő múlásával maguk a szemtanúk elmennek, de az általuk készített korabeli terepi felvételek (fotók, filmek) megmaradnak. Ezeket a forrásokat is érdemes felhasználni, mert egyre nagyobb számban válnak elérhetővé digitalizált formában (pl. fortepan.hu)

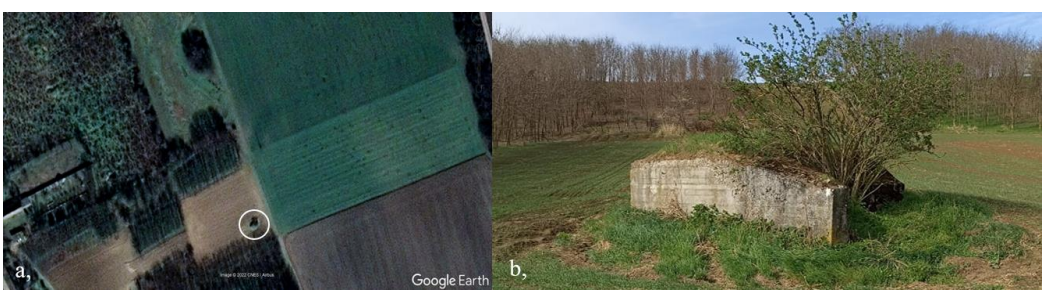
2.2 Légi- és űrtávérzékelés

A következő alfejezetekben a jól ismert mai térinformatikai adatgyűjtési eljárások következnek, melyeket alapvetően aszerint csoportosítottunk, hogy milyen távolságból történik meg az információszerzés. Elsőként a legnagyobb távérzékelési távolsággal rendelkező műholdas távérzékelés, majd a nagy magasságból készített légifényképezés, valamint lézerszkennelés lehetőségeit tekintjük át a katonai objektumok rekonstrukciójának szempontjából.

A műholdas távérzékelés műszaki jellemzőiből adódóan leginkább arra alkalmas, hogy redundáns módon ellenőrizzük egy-egy objektum létezését közvetlenül vagy a ráutaló nyomok alapján. Segíthet a mai helyszínek hatékony beazonosításában és felkeresésükben. Emellett, a légifényképekkel egyetemben jól használhatók a hagyományos régészetben is jól ismert prediktív modell készítéséhez (Mesterházy 2021), így többek között a potenciálisan kutatandó helyszínek beazonosításához. A klasszikus régészeti lelőhelyekhez hasonlóan az erődítési elemek elhelyezkedését is valószínűsíthetjük többek között a földrajzi környezet vizsgálatával. A távérzékelési eljárásokból származó magassági-, vegetációs-, vízháztartási és egyéb adatok alapján előzetesen lehatárolhatók a kutatandó területek. A 2. ábrán egy harckocsi árok korabeli légifényképe és a ma is megtalálható nyomai láthatóak (Wheatley 2019), míg a 3. ábrán a DVR egyik géppuska állása műholdképen, illetve maga az építmény látható a terepen.



2. ábra. A prohorovkai csata egyik harckocsi árka egy korabeli fényképen (a) és a mai műholdfelvételen (b) (Wheatley 2019)



3. ábra. A DVR Majs melletti géppuska állása (fehér kör) műhold felvételen (a) és a terepen (b)

Ezekben az esetekben tehát alapvetően arról van szó, hogy már meglévő információk alapján azonosítjuk a katonai objektumokat a műhold képeken. Azonban előfordul, hogy közvetlenül a képen is felismerhető egy-egy objektum vagy annak nyoma. A korábbi képeken a méretük miatt csak a harckocsi árkokról lehetett szó, azonban az egyre jobb felbontású felvételeken már a kisebb méretű objektumok (lövészárok, gránáttölcsérek) azonosítását is lehetővé teheti. Sokszor segíthet a növényzet vagy a talaj elváltozásainak vizsgálata. A 4. ábrán a Balaton észak keleti végéből induló Margit-vonal részeként épített harckocsi árok darabjának mai képe látható a Google műhold felvételén.

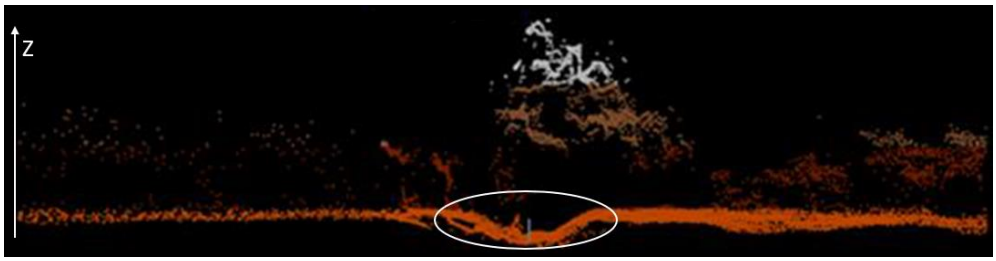
A légifényképezés minőségében igen sokat fejlődött az elmúlt évtizedekben. A hagyományos légifotogrammetria újabb és újabb felvételei természetesen felhasználhatók a rekonstrukciókban, de alapvetően arra kell törekednünk, hogy a vizsgált korszakhoz minél közelebbi időpontban készült

felvételekkel dolgozzunk. Az egyre jobb minőségű felvételekkel nem lehet kiváltani a régebbi archív anyagokat, azok korhű adattartalma miatt, hiszen az évek múlásával egyre inkább eltűnnek a régi objektumok és nyomaik a terepről. Azonban a mai felvételekből is nyerhetők fontos információk. A látható fény és a közeli infravörös tartományban készített képeken a vegetáció és a talaj jellegzetes elváltozásait, mint indikátorokat használhatjuk a föld alatti objektumok azonosításában (Szabó 2016). Összességében elmondhatjuk, hogy a kutatásokban a korabeli állapotokat minél realisztikusabban megjelenítő archív felvételek kerülnek alapvetően felhasználásra, lehetőleg kiegészítve a mai jó minőségű felvételekkel.

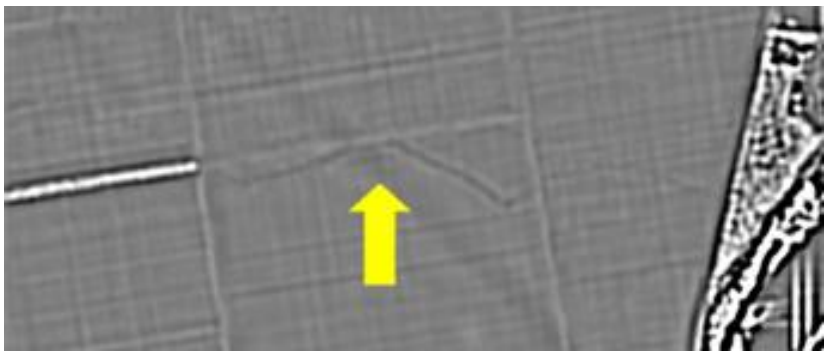
4. ábra. A Margit-vonal betemetett harckocsi árkának egy részlete Balatonfűzfő és Papkeszi között a Google Earth 2021.10.31-ei felvételén

Napjaink egyik legelterjedtebb és leghatékonyabb légi adatgyűjtési eljárása a légi lézerszkennelés (Airborne Laser Scanning, ALS). A szenzorok többféle repülő platformra is integrálhatók, jellemzően 50-100 méteres repülési magasságtól egészen 5000 méterig használhatók (Lovas et al. 2012). Ebben az alfejezetben a nagy távolságról, döntően repülőgépről végrehajtott felmérések adatainak lehetséges felhasználására térünk ki. Egy átlagos légi szkennelés pontfelhőjének műszaki jellemzőit tekintve kijelenthetjük, hogy az eljárás tökéletesen alkalmas katonai objektumok terepi nyomainak, maradványainak felderítésére, azonosítására. Az (5-10) pont / m^2 pontsűrűség, a deciméteres nagyságrendű horizontális és vertikális pontosság lehetővé teszi az 50-70 évnyi környezeti, mikrodomborzati változások után is az árkok és különböző építmények terepi pontjainak azonosítását, szűrését. A lézerszkennelés jól ismert előnye, hogy akár sűrű vegetációval fedett területek alatti tereppontok bemérésére is alkalmas, a többszörös visszaverődésből származó többszintű pontfelhő detektálása miatt. Ez a jellemzője kiemelten hatékonnyá teszi a technológiát a katonai objektumok detektálásában és rekonstrukciójában, hiszen a napjainkban is fellelhető nyomok jelentős része növényzettel fedett területeken található meg. Ezen objektumok környékét nem véletlenül nem művelték meg: az elbontás költségei igen magasak lehetnek, illetve sokszor veszélyt jelentenek. Korábbi kutatásainkban bemutattuk, hogy a LiDAR pontfelhők felhasználásával egyértelműen be lehet azonosítani korábban betemetett harckocsi árkot, lövészárkot vagy akár vasbeton építményeket. Az alábbi ábrákon sorrendben a következő helyszíneket és katonai objektumokat mutatjuk be:

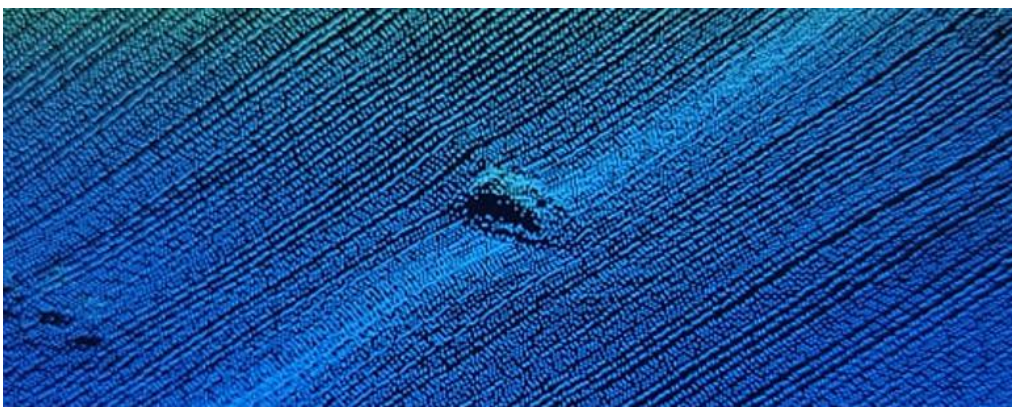
- Kisgyőr, lövészárok ALS pontfelhőből képzett keresztmetszeten (5. ábra)
- Sátorhely, betemetett harckocsi árok ALS pontfelhőn, élkiemelés után (6. ábra)
- Majs, géppuska állás a nyers ALS pontfelhőn (7. ábra)



5. ábra. Lövészárok (fehér ellipszis) az ALS pontfelhő keresztmetszetén, a Z koordináta a terepmagasságot jelöli



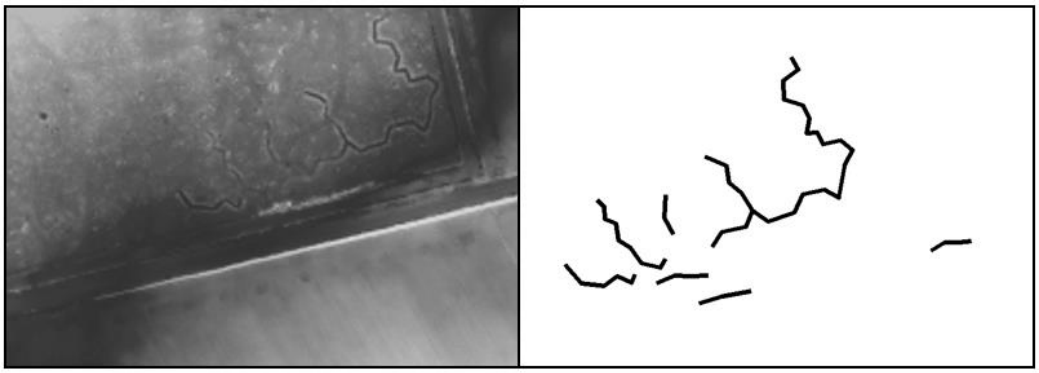
6. ábra. Betemetett harckocsi árok nyomai élkiemelés után



7. ábra. Géppuska állás a nyers ALS pontfelhőn

Amennyiben a megfelelő sűrűségű és pontosságú pontfelhő áll rendelkezésre és a vizsgált területen nagy mennyiségű, közel azonos karakterisztikájú objektum van (pl. nagy számú lövészárok), akkor érdemes az objektumok azonosításának, kiértékelésének automatizálását megfontolni. Korábbi kutatásaink eredményeképpen sikerült olyan eljárást kidolgozni, amely alkalmas a lövészárkok automatikus azonosítására ALS adatokból (8. ábra) levezetett digitális terep-modellen (DTM). Az eljárás legfontosabb lépései az alábbiak (Juhász és Neuberger 2018):

1) DTM generálása a mintaterületről,
2) Trendfelület kialakítása simító szűrő alkalmazásával,
3) Különbségkép előállítása az eredeti és a trendfelületből,
4) Küszöbölés a célobjektumok magassági eltéréseinek figyelembevételével,
5) Az irrelevánsan kicsi és nagy pixelfoltok törlése,
6) Morfológiai szűrők használata,
7) Végül a túl kicsi és túl nagy objektumok törlése ismételten.



8. ábra. Lövészárkok automatikus kiértékelése (jobb) ALS adatokból levezetett DTM (bal) segítségével

2.3 Terepi vagy kis távolságú légi adatgyűjtés

Ebben az alfejezetben a kis távolságú légi-, és a földi adatok kiértékelésén alapuló fotogrammetria, illetve lézerszkennelés (Terrestrial Laser Scanning, TLS) lehetőségeit tárgyaljuk a katonai objektumok rekonstrukciójának tükrében. Ezen módszerek tökéletesen helyettesíthetik a korábbi hagyományos terepi felméréseket. Tradicionálisan az objektumok felmérése - koncentráltan a karakterisztikus pontokra - földi geodéziai eljárásokkal, vagy akár mérőszalagos mérésekkel történt. Mindkét új felmérési módszer segítségével nagyon nagy (cm) felbontású 3D-s modellek hozhatók létre a vizsgált objektumokról, így az előrelépés egyértelmű. Ezek az igen részletgazdag és nagy pontosságú modellek új lehetőségeket nyitottak a felhasználás területén:

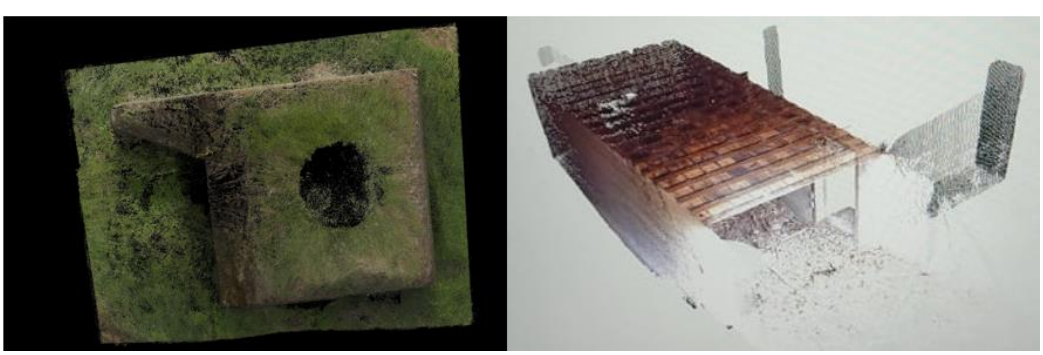
- nyilvántartás, katalogizálás, állagmegőrzés,
- jellemző műszaki paraméterek kinyerése (méretek, metszetek),
- integráció más forrásokból származó adatokkal, modellekkel (adatfúzió).

Az előző fejezetben leírt, a távérzékelési távolságot figyelembe vevő megközelítést szem előtt tartva, elsőként a kis távolságról végrehajtott drónos adatgyűjtéseket ismertetjük. A drónokra integrált különböző szenzorok segítségével többek között lézerszkennelést és fényképezést is végrehajthatunk. Ezeket a megoldásokat sok szakterületen alkalmazzák nagyon hatékonyan: a teljesség igénye nélkül például a BIM (Giuseppina et al. 2017), a klasszikus régészet (Agudo et al. 2018) a geológia (Zieher et al. 2018) vagy éppen környezeti tanulmányokban (Giannetti et al. 2018). A lézerszkennelés alkalmazásával ez esetben egy jóval nagyobb felbontású, részletességű és pontosságú pontfelhőhöz és 3D modellhez juthatunk a kisebb szenzor – tárgy távolság miatt. A pontok száma tipikusan 50-200 pont/m^2 -t is elérheti, az abszolút pontosság horizontálisan 10 cm körüli lehet a repülési magasság függvényében, vertikálisan pedig 10 cm alatti. Természetesen ezek a jellemzők tovább javulhatnak a néhány 10 méteres felvételezési távolság esetében, valamint attól függően, hogy használunk-e terepi illesztő pontokat (Ground Control Point, GCP) és mennyit. Véleményünk szerint a klasszikus légi és földi szkennelés között elhelyezkedő eljárásnak, illetve az ebből származó adatoknak nincs túl nagy relevanciája az általunk korábban említett modern katonai objektumok rekonstrukciójában, hiszen előbbi két megoldás hatékonyabban használható a hadműveleti, illetve taktikai szintű vizsgálatoknál. Amennyiben a rekonstruált építmény nagysága ezt indokolja akkor természetesen ez a köztes megoldás is jól alkalmazható, hasonlóan az ebből a távolságból készített fényképek feldolgozásához. A szakirodalomban igen sok ilyen típusú felhasználásra találunk példát (Cardenal et al. 2016, Masiero et al. 2019). Amennyiben a modern korok katonai objektumok fotogrammetria alapú modellezésére, illetve rekonstrukciójára kell példát találnunk, akkor elegendő a legnagyobb 3D-s objektumok megosztását, letöltését kínáló honlapokat felkeresnünk. A 9. ábrán egy 2. világháborús vasbeton bunker modellje látható (Bunker LI/17/A-200Z**)** egy ilyen weblapról (sketchfab.com/3d-models/bunker-li17a-200-z-1cb8932bfeb94834bcd76995480f5ea0).

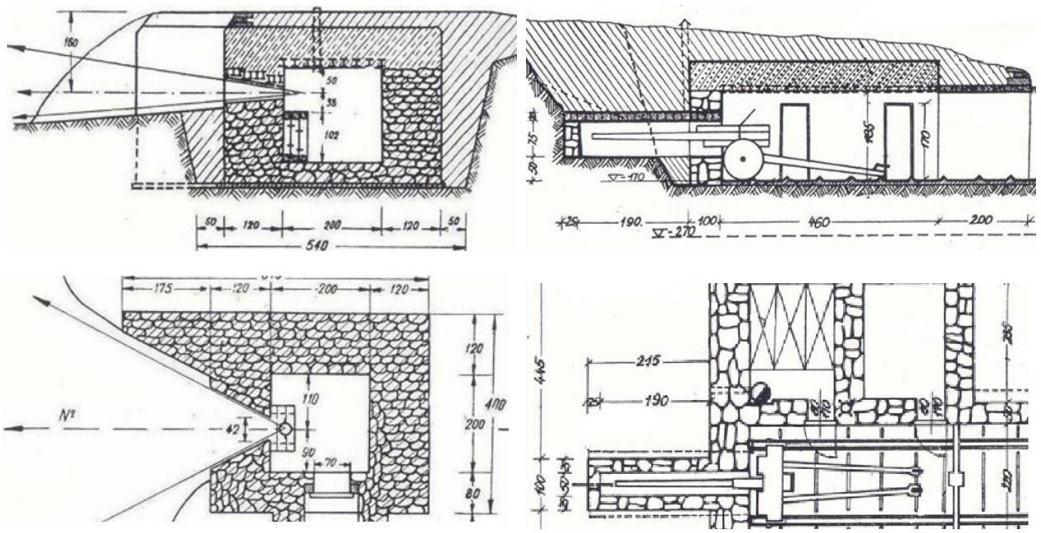
9. ábra. 3D-s bunker modell (https://sketchfab.com/3d-models/bunker-li17a-200-z-1cb8932bfeb94834bcd76995480f5ea0)

A földi adatgyűjtési eljárások közül elsőként a TLS lehetőségeit tekintjük át. A földi szkennelés értelemszerűen az eddig tárgyalt LiDAR eljárások közül a legnagyobb felbontású és pontosságú pontfelhőt biztosító, 3D felmérésre alkalmas módszer, nyilván a legkisebb területi fedéssel. A szkennerek hatékony mérési távolsága 0.5 és 60-80 méter között van, pontosságuk mm-es nagyságrendű is lehet. Különösen jól alkalmazhatók ebben a speciális esetben, hiszen sokszor a rekonstruált objektumok egyes részei növényzettel borítottak, így például a fotogrammetriához képest több hasznos információt szolgáltathatnak. Nyitott terepen lévő objektumok esetében viszonylag egyszerű a szkennelés kivitelezése, de sűrűbb vegetáció esetén érdemes nagyon körültekintően eljárni az álláspontok és az esetleges kapcsolópontok helyzetének kiválasztásában. Külön kihívást jelent az építmények belső szkennelése. Sokszor szűkös (jellemző a földel való feltöltődés) sötét helyeken kell a nem túl stabil talajfelszínen megtalálni a jó álláspontokat.

A magyarországi katonai objektumok rekonstrukciójának során a DVR néhány jellegzetes vasbeton bunkerét szkenneltük be. Az egyes építmények igen változatos környezetben helyezkedtek el a nyitott tereptől a növényzettel egészen sűrűn benőtt területig bezárólag. Céljaink között szerepelt, hogy megvizsgáljuk a különböző külső feltételek hatását a feladat megoldására, illetve hogyan oldható meg a terepi szkennelés eredményének integrálása más források adataiba. Ez a kutatómunka jelenleg is zajlik, így egyelőre a TLS adatait tudjuk prezentálni. A 10. ábrán két objektum pontfelhője látható, majd a 11. ábrán a korabeli terveik. Mindkét ábra bal oldalán egy A/10 típusú vasbeton géppuska állás, míg a jobb oldalon egy A/16-os közepes páncéltörő ágyúállás fedett óvóhelye van ábrázolva. Mint az az ábrákból jól látható, a szkennelt állományok és a belőlük későbbiekben levezetett modellek nem csak arra alkalmasak, hogy könnyedén beazonosítsuk az egyes objektumokat, hanem kiépítettségi szintjükről, jelenlegi állapotukról és nagy pontossággal az irányultságukról is képet kaphatunk.

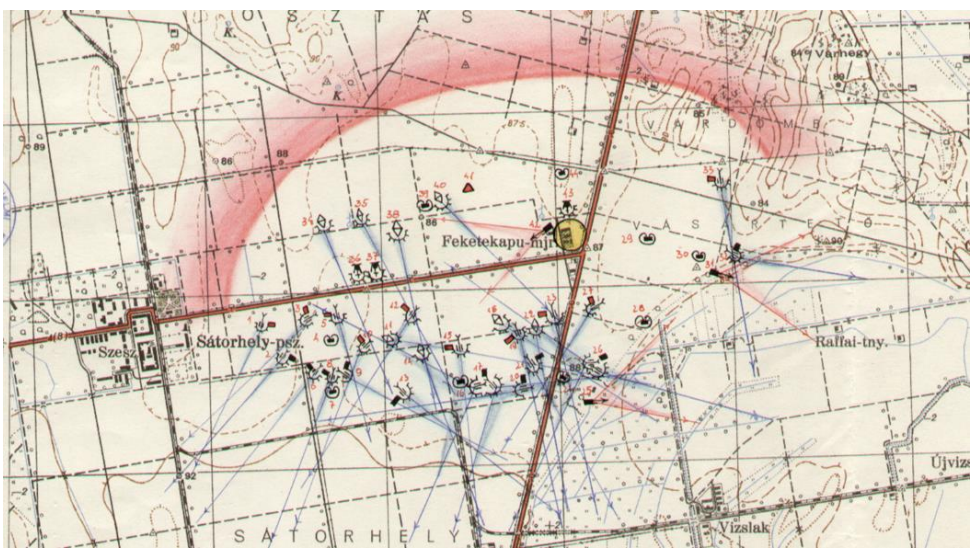


10. ábra. A/10-es (bal) és A/16-os (jobb) állások pontfelhője



11. ábra. A/10-es (bal) és A/16-os (jobb) állások tervrajzai, oldal- (fent) és felülnézetben (lent) (Suba et al. 2010)

Ezen utóbbi információ azért is érdekes, mert össze tudjuk vetni a korabeli térképi tervekkel (12. ábra) így rekonstruálva a tényleges védelmi stratégiát.

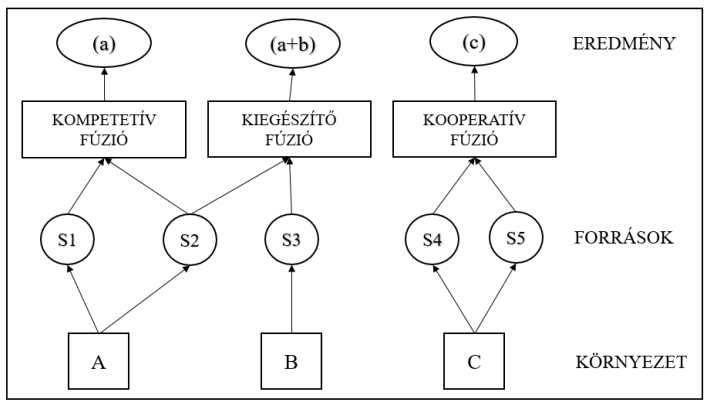


12. ábra. A Sátorhely melletti század szintű védőkörlet tervezett kialakítása (Suba et al. 2010)

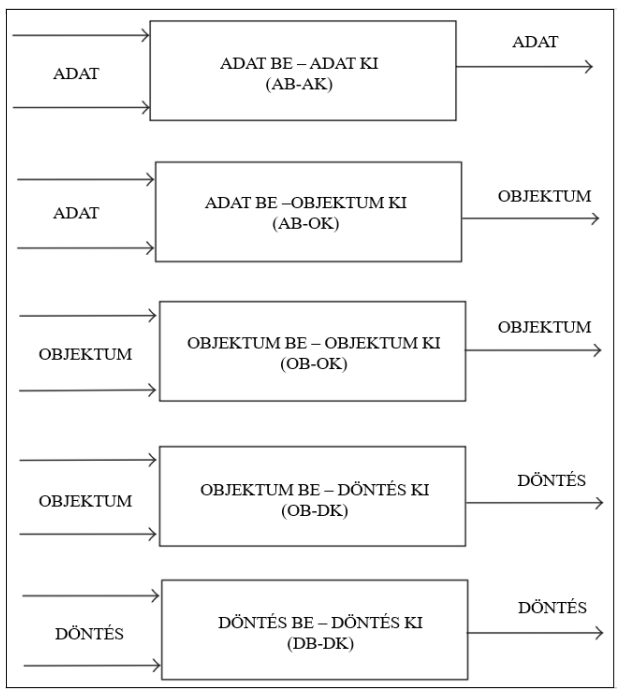
A TLS pontfelhőből levezetett 3D-s modellekhez hasonló paraméterekkel bíró modellek természetesen terepi fényképekből is előállíthatók. Ez esetben is ugyanazokkal a külső hátráltató körülményekkel kell számolnunk, mint a szkennelésnél, azonban a legnagyobb problémát az objektumok közvetlen környezetében lévő növényzet jelenti. A fotók segítségével értelemszerűen csak az objektumok látható felületrészei képződnek le, ami sokszor jóval kisebb lesz, mint szkennelés esetében. Nyitott terep esetén nagyon hatékony a fotogrammetria is. Ekkor érdemes fontolóra venni az így előállított modellek előnyeit: realisztikusabb megjelenítés, költséghatékonyabb folyamat stb.

3 Adatfúzión alapuló megoldások

Adatfúzió alatt több heterogén forrásból származó adat vagy információ integrálását, egyesítését értjük egységes feldolgozási és reprezentációs céllal. Mitchell HB (2007) szerint az adatfúzió elmélet, technikák és eszközök arra a célra, hogy különböző szenzoros vagy származtatott adatokat közös reprezentációs formára hozzunk. Szenzorfúzió során az a célunk, hogy növeljük az információ minőségét, hogy az egy számunkra releváns szempontból jobb legyen, mintha az adott forrásokat különkülön használnánk. A fúzió több szinten is megvalósulhat, és ahogyan egyre több adatforrás vált hozzáférhetővé, úgy nőtt ezen módszerek jelentősége. Az adatok és információk fúziója egy feldolgozási folyamat során különböző szinteken és technikákkal valósulhat meg. Durrant-Whyte (1988) a szenzorok kapcsolatát vizsgálva versengő (kompetetív), kiegészítő és kooperatív fúziós megoldásokat határozott meg (13. ábra), míg Dasarathy (1997) a bemenetek és kimenetek közötti kapcsolatokat írta le (14. ábra).



13. ábra. Fúzió a bemeneti adatok szerint Durrant-Whyte (1988) alapján



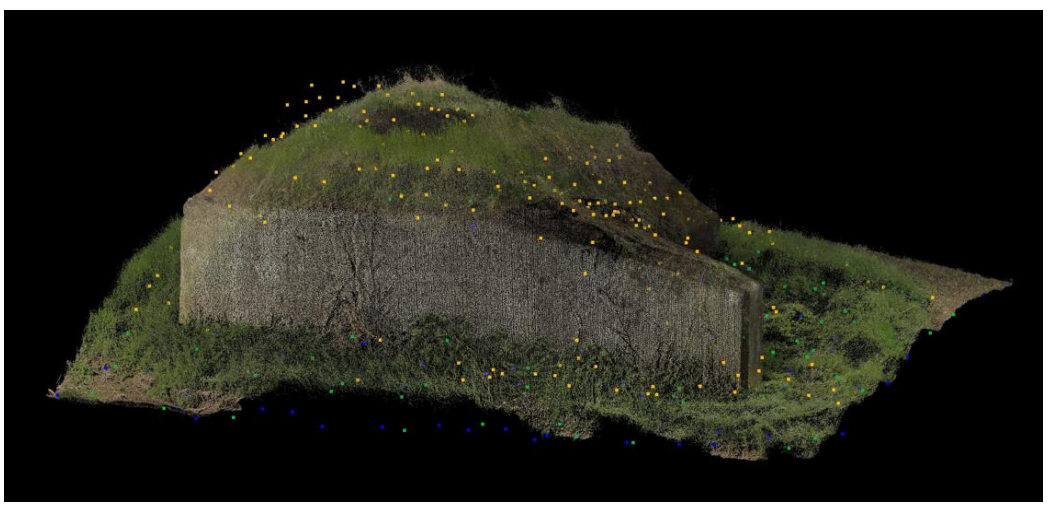
14. ábra. Fúzió a bemeneti és kimeneti jellemzők szerint Dasarathy (1997) alapján

Castanedo (2013) pedig olyan módszereket és algoritmusokat mutat be, amelyek három különböző kategóriát használnak: adattársítás, állapotbecslés és döntésfúzió. A mai csúcstechnológia már olyan szenzorokat biztosít, amelyek például egyetlen eszközben egyesítik akár egy nadír-fényképező multispektrális kamerát (RGB + NIR), több ferde látószögű kamerát és LiDAR-egységet (Lemmens 2020). Ezek az eszközök már önmagukban megvalósítják a szenzor- és adatfúziót.

Amióta a térinformatika tudománya létezik, a különböző adatok integrálásának és fúziójának képességét az egyik legfontosabb előnyeként említik. A különböző forrásokból származó nagy mennyiségű adat (vektoros/raszteres) integrálásának lehetősége garantálja, hogy pontos, teljes és megbízható modelleket és adatbázisokat hozzunk létre. A következő alfejezetekben olyan katonai objektum rekonstrukciókra mutatunk be nemzetközi és hazai példákat, amelyek valamilyen adatfúziós technológiát alkalmaztak. Természetesen nem csak ezek a megoldások léteznek. Minden ismert archív és modern adat integrálását egy egységes térinformatikai rendszerbe felfoghatjuk adatfúzióként. Esetünkben a modern adatgyűjtési megoldásokból származó információk együttes felhasználására koncentráltunk, mert a teljes spektrum áttekintése meghaladná jelen publikáció kereteit.

3.1 ALS és TLS adatfúzió

Mint korábban említettük, a teljes katonai objektum rekonstrukciós folyamatnak ideális esetben legalább két szintűnek kell lennie. A stratégiai szinten, ahol az egész erődítés rendszer (vonal) kerül vizsgálatra, többek között az ALS-alapú DEM használható. Másodszor, a katonai objektumok 3D modellje a taktikai elemzés alapját jelentheti. A nagy kihívást az jelenti, hogy ezeket az adatokat egyetlen egységes rendszerbe integráljuk. A különböző környezeti körülmények és az objektumok állapota miatt nehéz általános megoldást meghatározni erre az adatfúzióra. Ideális esetben a kiválasztott objektum jól azonosítható az ALS-adatokban, és elegendő látható objektumelem áll rendelkezésre az integráció végrehajtásához. Más esetekben meg kell vizsgálni a környező környezeti elemeket, hogy megfelelő számú közös pontot találjunk. További kutatómunkát igényel, hogy mennyiben és hogyan befolyásolja az ALS és TLS adatok illesztését a vizsgált objektum környezetének kisebb-nagyobb területű bevonása. Az objektumok méreténél és növényzettel való fedettségéből adódóan csak viszonylag kevés pont képződik le róluk az ALS felhőben, ami azt jelenti, hogy önmagukban ezekhez a pontokhoz szinte lehetetlen a TLS pontfelhő illesztése. Ekkor feltétlenül szükséges a környezeti elemek pontjainak a bevonása. A 15. ábrán a DVR egy bunkerének földi szkennelt pontfelhőjét mutatja, a területről készült ALS pontfelhőbe integrálva.



15. ábra. ALS és TLS adatfúzió megvalósítása a DVR A/10-es típusú bunkerénél

3.2 TLS és drón felvételek fúziója

Egy másik népszerű adatfúziós megoldás a TLS-adatok és az UAV-képalapú pontfelhők integrálása. Az utóbbi években számtalan példát lehet találni ennek az adatfúziós technikának az alkalmazására a legkülönfélébb tudományterületeken. Guisado-Pintado et al. (2019) környezeti és geomorfológiai elemzésében TLS és SfM (Structure From Motion) UAV technológiák segítségével modellezte egy strandszakasz felszínének topográfiáját és a dűnék morfológiáját. Épített környezetben, az épületek 3D modellezésekor a homlokzatokat általában TLS adatokból származtatják, az UAV-t pedig a tetőzet felvételére használják. Bouziani et al. (2021) hangsúlyozta e két technológia egymást kiegészítő jellegének fontosságát a részletes, teljes és pontos 3D modellek előállítása érdekében. Ma már az örökségvédelemben is elengedhetetlen a távérzékelt adatok felhasználása az építmények fenntartásához, állapotuk monitorozásához vagy akár az újjáépítésük támogatásához egy katasztrófa után, ahogy azt Chatzistamatis et al. (2018) publikációjában ismertette. Habár a TLS és UAV adatok együttes felhasználása igen elterjedt, modern korok katonai objektumainak feldolgozására nem találtunk példát. Így más korszakok erődítéseinek vizsgálatán keresztül ismerhetjük meg e megoldás alkalmazhatóságát. Sanseverino et al. (2022) egy HBIM (Historical Building Information Modelling) alkalmazás keretein belül publikált egy kutatómunkát, amely során TLS és UAV felmérésen, Scan-to-BIM modellezésen alapuló eljárással hozták létre a Crotone városában található V. Károly várának építészeti modelljét (16. ábra). Pepe et al. (2016) a nápolyi Castel Nuovo egy részének rekonstrukcióját végezte el közel-fotogrammetriai és lézerszkennelt adatok segítségével. Munkájuk során nagy hangsúlyt fektettek arra, hogy az ugyanazon objektumról mindkét technológiával, vagy ugyanazzal a technológiával, de különböző időpontban más-más fényviszonyok között regisztrált pontfelhő-adatsorok kombinálásával egy olyan végső pontfelhő hozható létre, amely hangsúlyozott színkülönbségeket mutat. Módszertant dolgoztak ki a különböző adatkészletek egységesítésére, a színminőség javítására és a további részletek kiemelésére a pontok színének kiegyensúlyozásával (17. ábra).

16. ábra. V. Károly várának építészeti modellje

17. ábra. A nápolyi Castel Nuovo egy részlete. Az eredeti TLS felmérés (fent) és a fényviszonyok okozta különbségeket kiküszöbölő textúra megjelenítés (alul)

4 Bombakráterek automatikus azonosítása

Külön fejezetben tárgyaljuk a bombakráterek azonosításának automatizálási lehetőségeit. A kráterek kiértékelésének több indoka lehet:

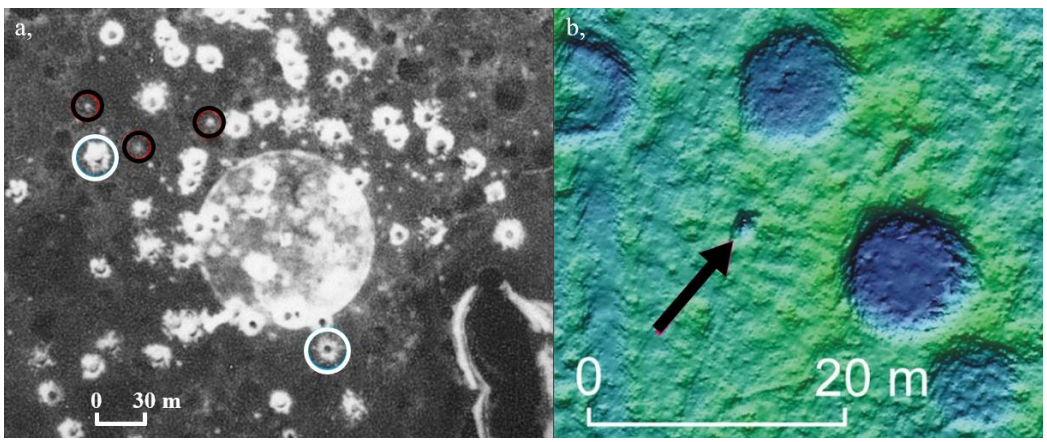
- a háború alatt az esetek többségében tüzérséggel és bombázásokkal is támadták az egyes védelmi vonalak részeit, így a külterületi erdős, fás részeken még ma is fellelhető bombakráterek a közelben lévő védelmi rendszerre vagy objektumokra utalhatnak. Azonosításukkal így prediktív módon támogathatjuk az objektumrekonstrukciót,
- ahogyan azt korábban említettük, a ledobott bombák 10-15%-a nem robbant fel és még a mai napig is veszélyt jelent, így egy adott terület támadásának nyomaiból következtethetünk fel nem robbant bombák jelenlétére és osztályozhatjuk az érintett területeket veszélyességük szerint.

A távérzékelés és térinformatika tudományterületén az utóbbi években jelentős számú kutatás folyt ebben a témában, melyeket csoportosítottunk. Van olyan irány, ahol magának a fel nem robbant bombának a nyomait keresik a felszínen különböző módszerekkel, illetve vannak, akik a bombakráterek azonosításán keresztül próbálnak eredményt elérni. A 18. ábrán felrobbant és fel nem robbant bombák nyomait láthatjuk légifelvételen (Byholm 2017) és egy pontfelhőből levezetett terepmodellen (Waga et al. 2022). Ha közvetlenül fel nem robbant bombát keresünk, akkor egy kráternél jóval kisebb nyomot kell megtalálni a terepen, ami komoly kihívást jelent. Természetesen ezekben az esetekben azokat a területeket kell választani, ahol a felrobbant bombák nyomait is megtaláljuk, hiszen ezek környezetében megtalálható néhány méteres terepi deformációkat érdemes megvizsgálni, kiértékelni. Egyéb területeken szinte bizonyosan nem ez áll a terepfelszín megváltozásának hátterében.

A bombakráterek direkt felderítésére és azonosítására számos kutatási eredmény találunk. Elsőként a fényképekből való kiértékelés lehetőségeit tekintjük át, melyekben hagyományos légi felvételeket alkalmaztak, de természetesen UAV felvételek is integrálhatók a leírt módszerekbe. Az archív légi felvételek alkalmazása a kráterek felderítésére komoly kihívásokkal jár. A minőségük - elsősorban a tisztaságot és a kontrasztot tekintve - általában alacsony. Mint az is ismert, az időjárási körülmények (köd, eső, felhők), az aktuális évszak (télen a hó, nyáron a növényzet) és a felbontás is nagyban befolyásolja a képek használhatóságát. Sok esetben a környezeti elemek (épületek, növényzet) árnyékai ugyanúgy képződnek le, mint a kráterek és megtévesztik az algoritmusokat. E nehézségek ellenére az elmúlt években számos jelentős eredmény került publikálásra. Néhány tipikus képalapú eljárás a következő:

– Multi-Scale Canny (MSC) éldetektor és a konvex csoportosítás használata (Emami et al. 2015),
– Marked Point Process (MPP) kombinációja Reversible Jump Markov Chain Monte Carlo (RJMCMC) mintavételezéssel (Kruse et al. 2019),
– Convolutional Neural Network (CNN) alkalmazása (Clermont et al 2019).

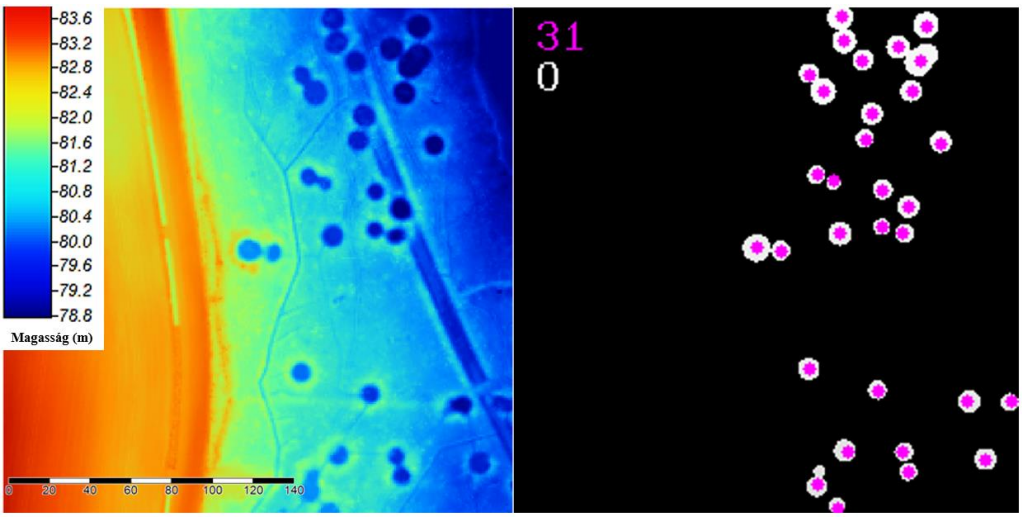
Ezek mellett számos példa található arra, hogy a légi adatokat más, akár roncsolásmentes technikákból származó információkkal egészítik ki. Barone (2019) egy fel nem robbant bombák kockázati térképének létrehozását mutatta be, archív légi felvételek, műholdképek és talajradar (GPR) adatok alapján.



18. ábra. Felrobbant (fehér kör) és fel nem robbant (fekete kör) bombák nyomai légifényképen (a), és LiDAR pontfelhőből levezetett DTM-en (b)

A légifényképek kiértékelése mellett a LiDAR felmérések adataiból is hatékonyan kinyerhetők a bombakráterek. Dolejš et al. (2020) olyan módszertant dolgozott ki, amely archív források és ezzel párhuzamosan LiDAR-alapú DTM alapján működik. Juhász és Neuberger (2018) egy automatizált bombakráter-felderítési eljárást és kockázati térkép készítést dolgozott ki (19. ábra), amely 1 m-es felbontású németországi ALS pontfelhőn alapul. Az azonosítási folyamat főbb lépései a következők:

– a kiválasztott terület pontfelhőjéből az erdők és fás területek kivágása, releváns területek megtartása,
– DTM generálása a pontfelhőből,
– a vizsgált terület trendfelületének létrehozása többszörösen használt simító szűrővel,
– az eredeti felület kivonása a simított felületből,
– bináris kép készítése egy magasságkülönbség-küszöbérték alapján,
– a bináris kép megtisztítása a zajtól és a túl nagy vagy túl kicsi objektumoktól (pixelhalmazoktól),
– a körkörösség ellenőrzése és a nem megfelelő objektumok eltávolítása egy határérték alatt,
– morfológiai szűrők: erózió, dilatáció és ezek kombinációinak (nyitás és zárás) alkalmazása a zaj csökkentésére, az önálló és összetartozó részletek elkülönítésére, valamint az intenzitás lyukak és csúcsok kezelésére,
– távolsági transzformáció alkalmazása az átfedő objektumok azonosítására.



19. ábra. Automatikus kráter detektálás egy németországi mintatterületen (jobb) LiDAR adatokból generált DTM-en (bal)

5 Összefoglalás

A térinformatikai adatgyűjtési eljárások, távérzékelési módszerek tárháza az utóbbi évtizedekben olyan nagy pontosságú és adatsűrűségű megoldásokkal bővült, amelyeket minden érintett szakterületen hatékonyan használnak. Így az utóbbi évekre már az olyan specifikus kutatásokban is alkalmazásra kerülnek, mint a hagyományos és modern kori régészet. Publikációnkban kísérletet tettünk a modern kori katonai objektumok rekonstrukciója során felhasználható tradicionális és modern adatgyűjtési és feldolgozási megoldások rövid összefoglalására. A releváns adatforrások áttekintésekor eredendően az időbeli megjelenésük, elérhetőségük sorrendjét vettük figyelembe. Így sorrendben az archív dokumentációk, a légi és műholdas felvételek, a légi lézerszkennelés, majd a drónok különböző szenzorokkal történő alkalmazása, végül a földi szkennelés lehetőségeit ismertettük. Külön kitértünk a modern adatgyűjtő technológiák fúziójának jelentőségére és alkalmazására ezen a területen. Végül néhány hazai és nemzetközi példán keresztül bemutattuk a katonai objektumok maradványainak, illetve a bombakráterek, fel nem robbant bombák felderítésének megoldásait, több esetben automatizált eljárásokkal. Törekedtünk arra, hogy minél több saját kutatásból származó eredményt és módszertant vonjunk be az áttekintésbe. Összességében látható, hogy az utóbbi évek információgyűjtő technológiái óriási előrelépést jelentettek a katonai objektumok rekonstruálásában, ahogyan a hagyományos régészetben, illetve örökségvédelemben is. Nagy tömegű, kiváló minőségű adatokkal hajthatjuk végre a 2D és 3D rekonstrukciókat a különböző méretarányokban, pontossággal és felbontással. Reményeink szerint a téma iránt érdeklődők átfogó képet kaptak a rendelkezésre álló térinformatikai és távérzékelési megoldásokról.

Hivatkozások

Agudo PU, Pajas JA, Pérez-Cabello F, Redón JV, Lebrón BE (2018): The Potential of Drones and Sensors to Enhance Detection of Archaeological Cropmarks: A Comparative Study Between Multi-Spectral and Thermal Imagery. Drones 2018, 2, 29. doi:10.3390/drones2030029

Barone PM (2019): Bombed Archaeology: Towards a Precise Identification and a Safe Management of WWII's Dangerous Unexploded Bombs, Heritage 2(4), 2704-2711. doi:10.3390/heritage2040167

Bouziani M, Chaaba H, Ettarid M (2021): Evaluation of 3D building model using terrestrial laser scanning and drone photogrammetry, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLVI-4/W4-2021, 39–42, doi:10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W4-2021-39-2021

Bunker LI/17/A-200Z, https://sketchfab.com/3d-models/bunker-li17a-200-z-1cb8932bfeb94834bcd76995480f5ea0, 2022-09-28.

Byholm B (2017): Remote Sensing of World War II Era Unexploded Bombs Using Object-Based Image Analysis and Multi-Temporal Datasets: A Case Study of the Fort Myers Bombing and Gunnery Range [Master's thesis, Minnesota State

University, Mankato]. Cornerstone: A Collection of Scholarly and Creative Works for Minnesota State University, Mankato. https://cornerstone.lib.mnsu.edu/etds/724/

Cardenal J, Pérez JL, Mata E, Delgado J, Gómez-López JM, Colomo C, Mozas A (2016): Recording and modeling of fortresses and castles with UAS. Some study cases in Jaen (southern Spain), Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLI-B5, 207–214, doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B5-207-2016

Castanedo F (2013): A Review of Data Fusion Techniques, The Scientific World Journal, Vol. 2013, Article ID 704504, 19. doi:10.1155/2013/704504

Chatzistamatis S, Kalaitzis P, Chaidas K, Chatzitheodorou C, Papadopoulou EE, Tataris G, Soulakellis N (2018): Fusion of TLS and UAV photogrammetry data for post-earthquake 3D modeling of a cultural heritage church, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-3/W4, 143–150, doi:10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-143-2018

Clermont D, Kruse C, Rottensteiner F, Heipke C (2019): Supervised detection of bomb craters in historical aerial images using convolutional neural networks Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W16, 67–74, doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W16-67-2019

Dolejš M, Samek V, Veselý M, Elznicová J (2020): Detecting World War II bombing relics in markedly transformed landscapes (city of Most, Czechia), Applied Geography, Volume 119, 102225, ISSN 0143-6228, doi: 10.1016/j.apgeog.2020.102225.

Durrant-Whyte HF (1988): Sensor models and multisensor integration, International Journal of Robotics Research, 7(6), 97–113.

Emami E, Bebis G, Nefian A, Fong T (2015): Automatic Crater Detection Using Convex Grouping and Convolutional Neural Networks. Advances in Visual Computing. ISVC 2015. Lecture Notes in Computer Science, 9475. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-27863-6_20

Giannetti F, Puletti N, Quatrini V, Travaglini D, Bottalico F, Corona P, Chirici G (2018): Integrating terrestrial and airborne laser scanning for the assessment of single-tree attributes in Mediterranean forest stands, European Journal of Remote Sensing, 51(1), 795-807, doi:10.1080/22797254.2018.1482733

Giuseppina V, Dessì A, Sacco A (2017): The Use of Nadir and Oblique UAV Images for Building Knowledge, ISPRS International Journal of Geo-Information 6(12) 393. doi:10.3390/ijgi6120393

Guisado-Pintado E, Derek WTJ, Rogers D (2019): 3D mapping efficacy of a drone and terrestrial laser scanner over a temperate beach-dune zone, Geomorphology, 328, 157-172, doi:10.1016/j.geomorph.2018.12.013

Juhász A (2004): A XIX-XX. századi tábori erődítések a Kárpát-medencében. Hadtörténeti rekonstrukció térinformatikával. Várak, erődök, erődítések 2, Budapest, TINTA Könyvkiadó, 160.

Juhász A, Neuberger H (2018): Automatic identification of bomb craters and their potential areas. Mitteilungen der Osterreichischen Geographischen Gesellschaft, Austrian Academy of Sciences Press, 241-258, doi:10.1553/moegg160s241

Juhász A, Winkler G (2013): Hadtörténeti rekonstrukciók új eredményei a távérzékelés és a GIS alkalmazásával, Geomatikai Közlemények XVI, 89-100.

Kruse C, Rottensteiner F, Heipke C (2019): Marked Point Processes for the automatic detection of bomb craters in aerial wartime images. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W13, 51-60.

Lemmens M (2020). Capturing LiDAR and Imagery Simultaneously: How Major Cities May Benefit from a Hybrid Sensor System. GIM International, 34(1), 10-13.

Lovas T, Berényi A, Barsi Á (2012): Lézerszkennelés (Monográfia), TERC, Budapest, 166.

Masiero A, Chiabrando F, Lingua AM, Marino BG, Fissore F, Guarnieri A, Vettore A (2019): 3D modeling of Girifalco fortress, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W9, 473–478, doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-473-2019

Mesterházy G (2021): Impoving the Quality of Archaeological Predictive Models. Communicationes Archaeologicae Hungariae, 2019, 5–30. doi:org/10.54640/CAH.2019.5

Mitchell HB (2007): Multi-sensor data fusion: An introduction, Springer, Berlin, 282, doi:10.1007/978-3-540-71559-7

Pepe M, Ackermann S, Fregonese L, Achille C (2016). 3D Point Cloud Model Color Adjustment by Combining Terrestrial Laser Scanner and Close Range Photogrammetry Datasets. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Computer and Information Engineering 10(11), doi:10.5281/zenodo.1127246

Sanseverino A, Messina B, Limongiello M, Guida CG (2022): An HBIM Methodology for the Accurate and Georeferenced Reconstruction of Urban Contexts Surveyed by UAV: The Case of the Castle of Charles V. Remote Sens. 2022(14), 3688. doi:10.3390/rs14153688

Suba J, Jakus J, Négyesi L, Holló J, Bajáki B (2010): Betonba zárt hidegháború., Budapest, HM Hadtörténeti Intézet és Múzeum, 204.

Szabó M (2016): Régészet madártávlatból. Archaeolingua Alapítvány, Budapest, 304.

Szikszai Cs (2017): Hungary's World War II bomb bay database, Proceedings of Theory Meets Practice in GIS, II, Debrecen, Hungary, 25-26 May 2017, 337–342.

Waga JM, Szypuła B, Fajer M (2022): The Archaeology of Unexploded World War II Bomb Sites in the Koźle Basin, Southern Poland. International Journal of Historical Archaeology, doi:10.1007/s10761-022-00672-5

Wheatley B (2019): A visual examination of the battle of Prokhorovka, Journal of Intelligence History, 18(2), 115-163, doi:10.1080/16161262.2019.1606545

Zieher T, Toschi I, Remondino F, Rutzinger M, Kofler Ch, Mejia-Aguilar A, Schlögel R (2018): Sensor- and scene-guided integration of TLS and photogrammetric point clouds for landslide monitoring, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2, 1243–1250, doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-1243-2018

Benyújtva: 2022.11.15 *Közlésre elfogadva: 2023.05.26*

A FORGÓLÉZERES SZINTKITŰZŐK VIZSGÁLATÁRÓL

Orbán Aladár, Kalmár János*, Gribovszki Katalin**

About the examination of the rotary laser level equipment *– We have been studying rotary laser level markers in our laboratory for a long time, despite the fact that we know its internal structure better.*

In the case of instrument calibration, the measurement results must be traced back to some standard, so that we can qualify the measurement accuracy of the tested instrument. However, there is no standard for level measurement, so it is a problem to compare the measured REAL values with the SHOULD value.

Initially, we only examined the differences in different directions on scales placed at the same height on the four walls of the room. Later, during the calibrations, a standard replacement solution had to be provided, in which we determined the error-free SHOULD value, which would be the reading value of the horizontal laser light coming out of the instrument on the wall scales. From the difference between the REAL values loaded with the instrument error and the SHOULD value obtained during the actual examination of the rotating laser, later we were able to determine the values of the always simultaneously occurring horizon skew (α) and the cone error (β) separately. To verify the correctness of its formulas, the rotating laser was replaced with a theodolite, in which the values of the two error sources can be preset, and then these values should appear in the calculations after the standard test.

Keywords: rotary laser level equipment, horizon-skewness, cone error, theodolite

Laboratóriumunkban régóta foglalkozunk forgólézeres szintezőműszerekkel, annak ellenére, hogy nem ismerjük a műszer belső szerkezetét.

Műszerkalibrálás esetén a mérési eredményeket valamilyen etalonra kell visszavezetni, hogy minősíteni tudjuk a vizsgált műszer mérési pontosságát. A szintmérésnek azonban nincs etalonja, ezért gondot jelent annak a kérdésnek a megválaszolása, hogy a mért VAN értékeket milyen KELL értékkel hasonlítsuk össze.

Kezdetben csak a laboratórium termének négy falán azonos magasságban elhelyezett skálákon vizsgáltuk a különböző irányú eltéréseket. Később a kalibrálások során valamilyen megoldást kellett találnunk, amellyel meg tudtuk határozni azt a hibamentes KELL értéket, ami a fali skálákon a műszerből kilépő vízszintes lézerfény leolvasási értéke lenne. Végül a műszerhibával terhelt VAN értékek és a forgólézer tényleges vizsgálata során kapott KELL érték különbségéből meg tudtuk határozni a mindig egyidejűleg előforduló horizontferdeség (α) és a kúphiba (β) értékét külön-külön is. A képletek helyességének ellenőrzésére a forgólézert teodolittal helyettesítettük, amelyen a két hibaforrás értéke előre beállítható, és így ezeknek az értékeknek kell megjelenniük a tényleges vizsgálat utáni számításokban is.

Kulcsszavak: forgólézer, horizontferdeség, kúphiba, teodolit

1 Bevezetés

A forgólézeres műszernek (https://laserlevelguru.com/using-rotary-laser-level/, 2022-11-02) a leggyakrabban használt feladata az, hogy a műszerből kilépő vízszintes lézer-sugarat körkörösen vetítse szét a térben. Az elkerülhetetlen szabályozási hibák miatt azonban a fény útja általában a vízszintestől kis szöggel bár, de eltér.

A kivetített fénynek a mérőlécen megjelenő magassága legpontosabban fényfogó detektorral, vagy sugárfogó berendezéssel állapítható meg. (Ezek műszertartozékok.)

Az ELKH FI műszercsarnokában, azaz a laboratóriumunkban a forgólézeres szintezőműszerek hibáinak vizsgálatára a következő távolságok állnak rendelkezésre: a laboratórium hosszirányában

**FI, 9400 Sopron, Csatkai u. 6-8.*
E-mail: gribovszki.katalin@epss.hu

30 m, keresztirányban 4,6 m. A vizsgálatban résztvevő műszerek felállításához a terem közepén 25 m hosszban vasbeton pillérsor húzódik végig.

2 A vizsgálatok előkészítése

A laboratórium 30 m-es hosszának „A”-val és „C”-vel jelölt két végpontját megjelöljük a falon (1. ábra). Az AC távolságnak a pilléren „K”-val jelölt felező pontjából kitűzünk két merőleges irányt. Az egyik, a KA iránytól 90 fokkal tér el, ez lesz a „B” pont, a másik, a KA iránytól 270 fokkal tér el. Ez lesz a ”D” pont.

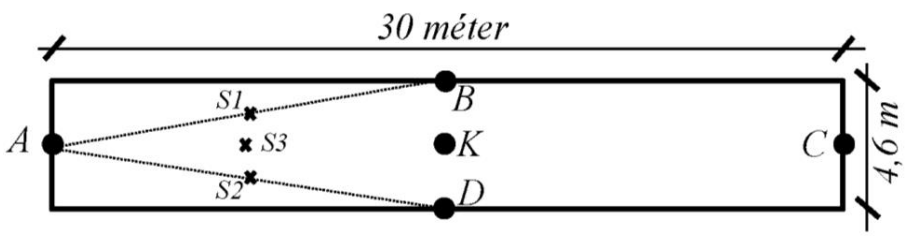
Az „A”, „B”, „C”, „D” pontokon mm-osztású, függőleges helyzetű skálákat helyeztünk el egyforma magasságban. A skálák magassági értelemben kissé elmozgathatók és a függőlegesítéshez kismértékben szögben is állíthatók, majd ebben a helyzetben stabilan rögzíthetők. A léptékeket úgy kell a falra erősíteni, hogy azok mm osztása mellett egy jelfogó berendezést fel és le irányban tologatni lehessen. Ha a tologatás közben a jelfogó a vizsgálandó műszer által kibocsátott forgólézerfény magasságába jut, akkor hangjelzést ad, és ilyenkor a jelfogó indexvonalának magassága a mm skála mentén leolvasható.

Az „A” és „C” lécek egyforma magasságának beállítása a köztük lévő távolság felezőpontjából felsőrendű szintezőműszerrel történik. A „B” és „D” skálák beállításához a pilléren újabb segédpontokat kell kijelölnünk a felsőrendű szintezőműszer számára. A pilléren kijelölt „S1” pont egyenlő távolságra van az „A” és „B” pontoktól, az „S2” pedig az „A” és „D” pontoktól.

A vizsgálandó forgólézer a „K” ponton olyan műszertalpon áll, amelynek felső síklapja három talpcsavarral vízszintesre állítható. A műszert a használati utasításnak megfelelően mérő helyzetbe állítjuk. Ez a korszerűbb műszereknél −egy szelencés libella beállítása után −automatikusan is megtörténik. Ilyenkor a műszer állótengelye, amely körül a fény forog, függőleges.

(A forgólézer belső szerkezetéről bővebb ismeretekkel nem rendelkezünk, de feltételezhető, hogy a lézerfény a műszer állótengelyéből lép ki, így az is függőleges irányú. A fény útjában helyezik el a függőleges állótengely körül forgó, lézerfejben lévő derékszögű prizmát, amely kellő gyári szabályozás után, vízszintes irányba téríti el a fény útját. Ha ez fennáll, akkor a falon lévő skáláinkon megjelenő fény egyforma magassági értékeken jelenik meg, a műszermagasságnak megfelelően.

A továbbiakban műszermagasságnak azt a helyet tekintjük, ahol a lézerfény a műszer ablakában megjelenik.)



1. ábra. A mérési elrendezés felülnézetben

3 Hibaforrások

Horizontferdeség (α): A forgólézeres műszernek akkor van horizontferdeségi hibája, ha a kivetített sugár merőleges ugyan az állótengelyre (ill. forgástengelyre), de az állótengely nem függőleges. Ilyenkor a műszer nem vízszintes síkot, hanem körkörösen ferde síkot tűz ki. Az okozott vetítési hiba értéke irányfüggő. Maximális értéke akkor adódik, ha a műszerből kibocsátott lézerfény iránya az állótengely-ferdeség irányába esik.

Tételezzük fel, hogy a „K” ponton álló műszernek csakis horizontferdeségi hibája van, és a forgástengelye az „A” pont felé dől. Ebben az esetben a ferde állótengelyre merőlegesen haladó fénysugár az „A” lécen a legalacsonyabb negatív értéken áll, az ellenkező irányban, a „C” lécen pedig a legmagasabb pozitív értéken. Ha az utóbbi helyről kiindulva szakaszosan forgatni kezdjük a lézerfejet, pl. a „D” léc irányába, akkor a fény magassági szögértéke egyre csökkenni fog. 90 fokos elforgatás után, a „D” lécen megjelenő fénymagasság megegyezik a műszerből éppen kilépő fény magasságával.

A fény itt tehát vízszintesen halad, magassági szögértéke nulla érték. Ebből következik, hogy bármekkora is a horizontferdeség értéke a maximális irányban, az erre merőleges irányban az egyedül általa okozott vetítési hiba nulla értékű. Tehát a merőleges irányban esetlegesen fellépő nullától eltérő értéket nem a horizontferdeség okozhatja, hanem attól különböző más hibaforrás, azaz ha a horizontferdeségen kívül más hibaforrás is van, akkor csupán ennek a más hibaforrásnak a hatása jelenik meg a skálán. Ilyen hiba pl. a kúphiba által okozott vetítésit hiba.

Kúphiba (β): Ha a forgólézernek csakis kúphibája van, akkor a forgó fejben lévő derékszögű prizma gyártása vagy szerelése hibával terhelt. Ennek következtében az állótengelyből kilépő függőleges fényt nem vízszintes irányban tereli tovább, hanem az mindig a vízszintes sík alatt, vagy mindig a vízszintes sík felett helyezkedik el. Körbeforogva nem vízszintes síkot, hanem kúppalástot ír le, amelynek csúcspontja a műszer állótengelyében van (tölcsér forma).

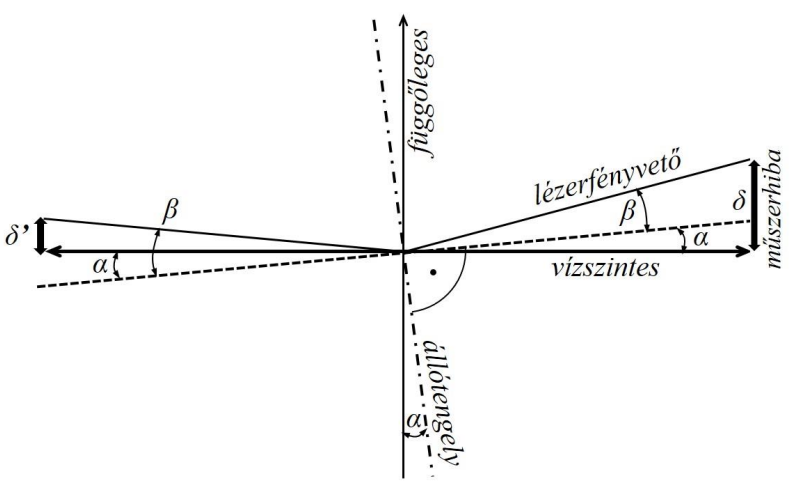
A horizontferdeségi hiba és a kúphiba azonban mindig együtt jelenik meg, s bár a kúphiba önmagában természeténél fogva állandó értékű, a két hiba együttes hatása mégiscsak irányfüggő.

Egyéb fogalmak:

Detektor (csipogó): A lézerfényt érzékelő berendezés, amely a kivetített fény magasságába helyezve hangjelzést és egy vízszintes jelet ad ki a léc skáláján.

Sugárfogó: Berendezés, amely nagyobb távolságon, vagy rossz fényviszonyok esetén a kivetített fényjelet felerősíti, és így fokozza a mérési pontosságot.

Holtjáték: A detektorral való mérés mm-skálán leolvasott értéke változhat attól függően, hogy a detektort lézerfény magassági értékét jelző hang és vízszintes jel megjelenésének pillanatában éppen felfelé vagy lefelé mozgattuk. Többször megismételve a jelkeresést, mindkét irányból meghatározható a holtjáték várható értéke, az adott fényviszonyok mellett, és az adott távolságon.



2. ábra. A horizontferdeség és a kúphiba által okozott vetítési hibák

Gyakorlati méréseknél célszerű megszokni, hogy a beállítási jelkeresést mindig ugyanabból az irányból végezzük.

A kivetített lézerfény általános helyzetét az 2. ábra mutatja:

4 Egyszerű műszervizsgálat

Ez az általunk is használt vizsgálati elrendezés bármely építési vállalatnál is kialakítható, amellyel megállapítható, hogy a műszert nem lenne-e célszerű javításra küldeni.

Körkörösen elhelyezett, egyforma magasságúra állított léptékeken megfigyeljük és feljegyezzük a körbeforgó lézerfény magasságának mm-ben kifejezett leolvasási értékét. A megbízhatóság növelése érdekében forgassuk el a műszert a vízszintes állványlapon 90 fokonként, és ismételjük meg a léptéken való leolvasásokat. Hibátlan műszer esetében a feljegyzett értékeknek elméletileg azonosnak kellene lenniük. Az eltérésekből kivehető, hogy az adott távolságon az elválaszthatatlan kúphiba és a horizontferdeség együttes hatása mekkora vetítési hibákat okoz. Számítható az eltérések átlaga, szórása, és a maximális hiba értéke is.

5 A forgólézeres szintkitűző műszer kalibrálása (A VAN-KELL hibaérték meghatározása)

Műszerkalibrálás esetén a mérési eredményeket valamilyen etalonra kell visszavezetni, hogy minősíteni tudjuk a vizsgált műszer mérési pontosságát. A szintmérésnek azonban nincs etalonja, ezért gondot jelent, hogy a mért VAN értékeket milyen KELL értékkel hasonlítsuk össze.

Laboratóriumunkban az etalont helyettesítő KELL érték meghatározására a következő módszert alkalmaztuk.

Tudjuk azt, hogy a műszerházból kilépő fénysugárnak vízszintes irányban kellene haladnia, illetve körbeforogva vízszintes síkot kell kitűznie. Ennek megfelelően egy hibátlan műszer esetében a műszer ablakában (tehát a műszermagasságban) megjelenő kilépő fénynek tovább haladva ugyanebben a magasságban kell megjelennie a léptékeken. Ezt a skálaértéket nevezzük KELL értéknek.

A KELL skálaérték meghatározására egy felsőrendű optikai szintezőműszert hívunk segítségül, amelyet a pilléren az „S3” ponton egyforma távolságban állítunk fel a „K” és az „A” pont között, de úgy, hogy a szintezőműszer ne takarja a KA irány fényútját (1. ábra). A forgólézer fényvetítő rendszerét álló fényre állítjuk. A kézzel is forgatható lézerfejet az „A” léptékre irányítjuk.

A továbbiakban a műszer ablakán megjelenő fény útjába fehér papírlapot helyezünk, amelyen megjelenik a piros lézerfény kör alakú foltja. Feltételezhető, hogy a műszer belsejében haladó rövid fényút miatt az ablakban megjelenő fényfolt helye csupán elhanyagolható vetítési hibával terhelt.

Ez a fényfolt a felsőrendű szintezőműszer ékszálával jól közrefogható. A vízszintes szál ugyanakkor kijelöli a kerek fényfolt közepét. Ha ezután a szintezőműszert a lécre irányítjuk, akkor a vízszintes szál mentén leolvashatjuk azt a mm-ben kifejezett KELL értéket, amelyet a műszerből kilépő vízszintes lézerfény tűzne ki.

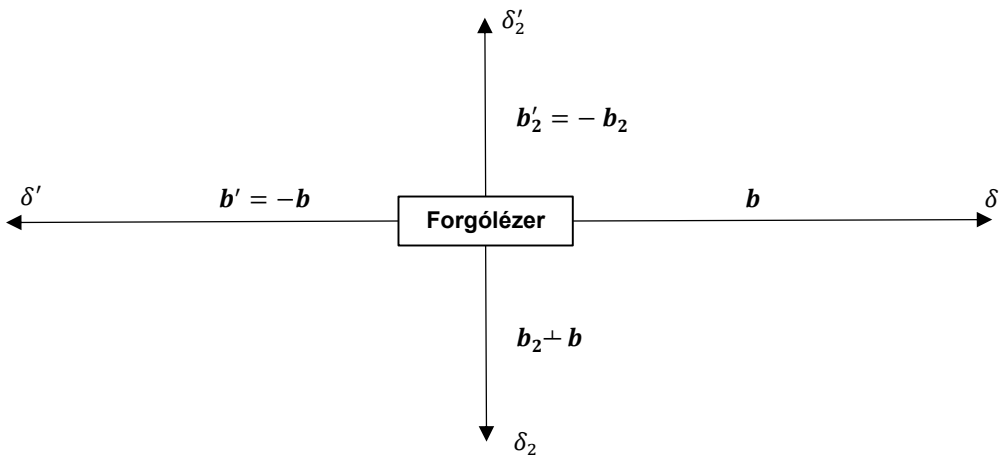
Ha ezek után a négy fali léptéken sorban leolvassuk a VAN értékeket, akkor számíthatók a VAN-KELL $= \delta$ [mm] különbségek, amely hibaértékek megmutatják, hogy a vizsgált azimutokban és az aktuális műszer-léc távolságokban (r) mekkora vetítési hibák adódnak a horizontferdeség és a kúphiba együttes hatására.

Ha a laboratóriumunkban rendelkezésre álló 15 m-es és 2,3 m-es távolságokon meghatározott δ [mm] értékeket osztjuk a hozzájuk tartozó léctávolsággal, akkor a vetítés hibája − a már ismertetett módon − a szögértékben is kifejezhető az adott irányokban.

A gyakorlati méréseknél előforduló egyéb távolságok részére, ezekkel a kalibrált szögértékekkel már előre kalkulálható a várható vetítési hibák értéke.

6 A horizontferdeség és a kúphiba különválasztása

A Kalmár et al. (2021) publikáció bebizonyította, hogy az eddig ismertetett vizsgálati módszerekkel külön-külön is meghatározható a horizontferdeség és a kúphiba értéke. Ennek a publikációnak a jelöléseihez igazodva a különböző indexekkel ellátott δ' és δ_2 értékek a korábbiakban említett „A”, „B”, „C”, „D” léceken leolvasott VAN hibaértékek, illetve a minden irányban egyforma léctávolságra átszámított VAN-KELL korrigált hibaértékek mm-ben kifejezve (3. ábra). A további képletek számítása ezekkel az értékekkel történik.



3. ábra. A skálapozíciók jelölései az óramutató járásával egyező irányban (a Kalmár et al. (2021) cikk 3. ábrája).
$\boldsymbol{\delta' = A}$ = **kezdőirány**

7 A publikációban megjelent vizsgálat menete és képletei

A „K” középpontban áll a vizsgálandó műszer. A műszer ablakán megjelenő fényfolt középpontját a kezdőlécre vetítve a leolvasás: 30 mm. Ez a műszermagasság értéke, egyúttal a vízszintesen haladó fénysugárnak a léceken megjelenő KELL értéke.

Adatok:
KA és KC távolság = 15 m,
KB és KD távolság = 2,3 m,
KELL-érték = 30 mm (= műszermagasság)

Az „A”, „B”, „C”, „D” skálákon észlelt VAN leolvasások (az órajárással egyező irányban) és a VAN-KELL értékek az 1. táblázatban találhatók.

1. táblázat. Az „A”, „B”, „C”, „D” skálákon észlelt VAN leolvasások és a VAN-KELL értékek

VAN értékek	VAN-KELL értékek
$A = 31{,}5\ mm$	$+1{,}5\ mm(15\ m - en) = \delta'$
$B = 30{,}0\ mm$	$+0{,}0\ mm(2{,}3\ m - en) = \delta_2'$
$C = 29{,}0\ mm$	$-1{,}0\ mm(15\ m - en) = \delta$
$D = 30{,}9\ mm$	$+0{,}9\ mm(2{,}3\ m - en) = \delta_2$

A mért VAN-KELL (δ) hibaértékek a háromszögek hasonlósága vagy a párhuzamos szelők tétele alapján számíthatók át $r = 10$ m-es, egyforma léctávolságra:

A: $\delta' = 1{,}5 \cdot 10/15 = 1$ [mm]

B: $\delta_2' = 0 \cdot 10/2{,}3 = 0$ [mm]

C: $\delta = -1 \cdot 10/15 = -0{,}67$ [mm]

D: $\delta_2 = 0{,}9 \cdot 10/2{,}3 = 3{,}91$ [mm]

Az így korrigált δ hiba-értékekből számítjuk a kúphiba értékét a hivatkozott (Kalmár et al. 2021) publikációban megadott képletek alapján a következőképpen:

A kúphiba számítása:

$$\beta = \frac{\delta+\delta'+\delta_2+\delta_2'}{4r} = (-0{,}67 + 1{,}0 + 3{,}91 + 0) \,/\, 40000 = 0{,}000106 \text{ radián} \cdot \rho'' = 22'' \quad (1)$$

A horizontferdeség számítási képletei:

$$\delta_{12} = \delta' - \delta = 1{,}0 + 0{,}67 = 1{,}67 \quad (2)$$

$$\delta_{34} = \delta_2 - \delta_2' = 3{,}91 - 0 = 3{,}91 \quad (3)$$

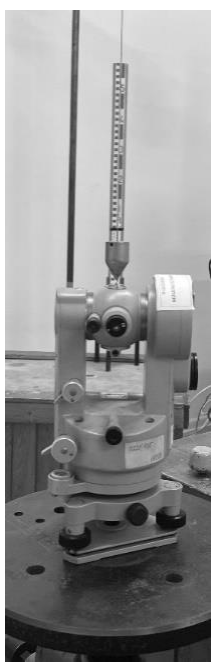
$$\alpha_{max} \approx \sin(\alpha_{max}) = \frac{\sqrt{\delta_{12}^2+\delta_{34}^2}}{2r} \qquad \alpha_{max} = (4{,}25/20000) \cdot \rho'' = 44'' \quad (4)$$

, ahol a $\rho'' = 206265$ az 1 radiánnak megfelelő szögérték másodpercben kifejezve.

8 A mérési és számítási módszer helyességének igazolása teodolittal

Az előbb alkalmazott képletek helyességének ellenőrzésére az előzőekhez hasonló, de egyenlő oldalhosszúságú, rövidebb pályán ($r = 3100$ mm) helyeztük el az „A”, „B”, „C”, „D” léceket.

A forgólézer helyettesítésére a kör középpontjában vízszintesre állított síklapra teodolitot állítottunk (4. ábra).



4. ábra. A teodolit, mint forgólézer (háttérben egy szintezőléccel)

A teodolitnak is van függőlegesre állítható állótengelye, továbbá e tengely körül forgatható alhidádéja, valamint vízszintesre állítható távcsöve, amelynek vízszintes szála (a teodolit szokásos felállítása után) kitűzi az egyik fali lécen (hasonlóan, mint a hibátlan forgólézerből kilépő vízszintes fény) a helyes műszermagasságot, azaz a KELL értéket. Esetünkben ez az érték: KELL = 26,0 mm.

A kezdőlécen („A") történő megfigyeléssel, a függőleges állótengelyű teodoliton szabadon beállíthatunk bizonyos mm-ben kifejezett hibaértékeket mind a horizontferdeség, mind a kúphiba számára. Az adott r távolságon kiszámíthatjuk ezek szögértékét is, ami által előre tudhatjuk, hogy a négy lécre korábban bemutatott vizsgálati módszertől milyen hibaértékeket kell kapnunk. (A kúphiba szögben kifejezett értéke a magassági körön közvetlenül is beállítható).

Legyen a kúphiba értéke a KELL értékhez viszonyítva -1 mm. A lécleolvasás: 25,0 mm.

A horizontferdeség hiba-értékét úgy állítjuk elő, hogy a teodolit állótengelyét a vizsgálat kezdőirányába állított talpcsavarral megdöntjük. Ennek értékét és irányát az érdekesség kedvéért válasszuk meg úgy, hogy az szintén 1 mm legyen, de a kúphibával ellenkező pozitív irányban. Ennek a beállításnak az az érdekessége, hogy a távcsövön beállított kúphiba és az állótengely döntésével előállított horizontferdeség együttes értékének ellenére a távcső vízszintes szála most ismét a 26,0 mm-es KELL értékre mutat.

Az ilyen hiba-előfordulás a forgólézereknél nyilván nagyon ritka lehet, de ha mégis előfordul, és a kivetített sugár az előzetesem meghatározott KELL értékre mutat, akkor a részletesebb vizsgálatokat már feleslegesnek tartjuk, és a műszert hibamentesnek ítéljük.

Nézzük most, hogy mit mutat a részletesebb vizsgálat. Ha a képletek jók, akkor a számítások végén vissza kell kapnunk a két beállított hiba-szögértékét, amit egyébként az adott léctávolság alapján előre is kiszámíthatunk:

$$\beta = -66" \text{ és } \alpha = +66". \ (\alpha = \rho" \cdot \delta / r = 206265" \cdot 1 \text{ mm}/3100 \text{ mm} = 66").$$

8.1 A hibaértékek beállítása

A kúphiba beállítása egyszerű, mert a hiba értéke nem irányfüggő. Tehát a „K" ponton szabályosan felállított teodolit vízszintes távcsövét, amely a kezdőlécen $26{,}0$ mm értékű KELL értékre mutat, most a magassági paránycsavarral $25{,}0$ mm-re állítjuk. Ezzel az adott távolságon $-66"$ értékű kúphibát okoztunk.

A horizontferdeség értéke azonban irányfüggő, és nekünk a maximális értéket kell beállítanunk. A maximális érték beállításához a teodolitot vízszintes síklapon kell felállítani és függőlegesíteni, de úgy, hogy a távcső iránya pontosan az egyik talpcsavar felé, egyúttal az „A" kezdőléc felé nézzen. Ez a beállítás fokozatos közelítéssel történik. Az alhidádé apró forgatásával ugyanis fel kell keresnünk azt az azimutot, amelynél az alhidádé-libella előzetesen középen álló buborékja nem mozdul ki a helyéről az állótengely apró megdöntése után sem. Ha ezt az irányt megtaláltuk, akkor a teodolit műszertalpát, (azaz az egész teodolitot) el kell forgatnunk a vízszintes síklapon úgy, hogy a távcső (és vele együtt a távcső irányában álló talpcsavar is) az „A" jelű kezdőléc felé nézzen. Ezután a talpcsavarral beállíthatjuk a kívánt állótengely-döntést, azaz a horizontferdeségnek a lécen kiválasztott maximális értékét, az alhidádé-libella helyzetének megváltozása nélkül.

8.2 Vizsgálati eredmények és kiértékelés

Adott kezdőértékek:

KELL érték $= 26{,}0$ mm az „A" lécen (az állótengely függőleges),

$\beta = -1 \text{ mm} = -66"$, A lécleolvasás: 25 mm,

$\alpha = +1 \text{ mm} = +66"$, A lécleolvasás: 26 mm,

Léctávolság a teodolittól az „A", „B", „C", „D" lécekig: $r = 3100$ mm.

A mért és számított értékeket a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat. A mért és számított értékek

VAN értékek [mm]	VAN-KELL értékek [mm]
$\mathbf{A = 26,0\ mm}$	$\mathbf{0 = \delta'}$
$\mathbf{B = 25,2\ mm}$	$\mathbf{-0,8 = \delta'_2}$
$\mathbf{C = 24,1\ mm}$	$\mathbf{-1,9 = \delta}$
$\mathbf{D = 25,0\ mm}$	$\mathbf{-1,0\ = \delta_2}$

Az (1) képlet alapján a kúphiba $= \beta = -62"$. A (2), (3), (4) képletek alapján a horizontferdeség $= \alpha_{max} = +63"$.

A gondos beállításoknak és méréseknek köszönhetően kapott értékek a $66"$-es előzetes értéket jól megközelítik. Levonhatjuk tehát azt a következtetést, hogy a Kalmár et al. (2021) publikációban ismertetett vizsgálati módszer alkalmas a forgólézeres szintkitűző minősítésére és a mindig együtt-jelentkező horizontferdeség és kúphiba különválasztására is.

9 Összefoglalás

Jelen cikkben egy bizonyos mérési eljárással foglalkoztunk, amit a forgólézeres szintezőműszerek mérési pontosságának ellenőrzésére fejlesztettünk ki. Módszerünk segítségével kiszámítottuk a hibamentes KELL értéket, amit a műszerhibával terhelt VAN érték és a forgólézer tényleges vizsgálata során kapott KELL érték különbségéből meghatározható horizontferdeség és kúphiba segítségével állítottunk elő. Egy korábbi publikációnkban (Kalmár et al. 2021) bizonyított számítási módszer segítségével különválasztottuk a két hibaforrást (horizontferdeség és kúphiba). Ezt követően a forgólézeres szintezőműszert teodolittal helyettesítettük és igazoltuk mind a mérési, mind a számítási módszer helyességét.

Végső következtetésképpen pedig leszögezhetjük, hogy a Kalmár et al. (2021) publikációban ismertetett vizsgálati módszer alkalmas a forgólézeres szintkitűző minősítésére és a mindig együtt jelentkező horizontferdeség és kúphiba különválasztására is.

Köszönetnyilvánítás. Ezúton mondunk köszönetet a cikk két bírálójának (Busics Györgynek és Bazsó Tamásnak) kéziratunk alapos és lelkiismeretes átnézéséért, kijavítgatásáért és ábrákkal történő kiegészítéséért. Hathatós közreműködésüket köszönjük!

Hivatkozások

Orbán A (2000): Minőségügyi kézikönyv. Forgólézeres szintezőműszerek kalibrálása. Belső használatra. 30.

Kalmár J, Orbán A, Gribovszki K (2021): Forgólézeres szintezőműszer hibaforrásainak elkülönítése. Geomatikai Közlemények, 24, 9-16.

„Rántsátok ki kérdéseiteket a földjükből,
és meglátjátok a csüngő gyökereket.
Az újabb kérdéseket.”

(Frank Herbert: A Dűne Káptalanház)

Benyújtva: 2024.10.25. *Közlésre elfogadva: 2024.12.02.*

MŰHOLDRADAR INTERFEROMETRIA ÉS GNSS MÉRÉSEK KOMBINÁLÁSA 3D-S DEFORMÁCIÓK MEGHATÁROZÁSÁRA

DOKTORI ÉRTEKEZÉS

Bozsó István[*]

Combination of satellite radar interferometry and GNSS measurements to determine 3D deformations *– There are several areas in Hungary where repeated measurement of surface displacements may be necessary. In such areas accurate observing of surface displacements caused by natural processes or human activities could help mitigate or potentially predict events that cause serious damages. Geodetic methods (GNSS precise positioning, leveling, geodetic station measurements) on the field are sufficiently accurate, however regular field measurements could be resource intensive. By reducing the frequency of measurements it is possible to reduce resource costs, but this could lead to the undersampling of surface deformations.*

The interferometric processing of the phase information (InSAR for short) contained in a SAR (Synthetic Aperture Radar) image enables the observation of deformations on the surface of the Earth. Using the InSAR method, it is only possible to determine the satellite line-of-sight (LOS) component of surface displacements in a relative sense. Another drawback of the method is the absence of persistent- or permanent scatterers on the field. If such scatterers are missing, artificial scatterers must be installed.

*I demonstrate the effectiveness of the InSAR method through an example application: I carried out modelling, based on InSAR derived deformations to determine the underground source parameters of surface deformations in Solotvyno, Ukraine. I introduce a novel methodology, the so-called ISIGN method, that is capable of combining surface displacements derived from InSAR and „classic" geodesic field measurements. The ISIGN method was developed in the framework of an ESA PECS (*Integrated Sentinel-PSI and GNSS technical facilities and procedures for the determination of 3D surface deformations caused by environmental processes*; 4000114846/15/NL/ND) and an NKFIH NKP (*Creating and analyzing the seismomectonic model of Hungary*; 2018-1.2.1-NKP-2018-00007) project.*

Keywords: InSAR, GNSS, surface displacements, corner reflector, Kalman filtering

Magyarországon számos olyan terület található, ahol szükség lehet felszíni elmozdulások rendszeres monitorozására. Ezeken a területeken az emberi tevékenységhez, vagy a természetes folyamatokhoz köthető felszínmozgások pontos megfigyelése segíthet a komoly károkat okozó események súlyosságának enyhítésében, esetlegesen a káresemények előrejelzésében. A geodéziai terepi mérések (GNSS pontos helymeghatározás, szintezés, geodéziai mérőállomás) megfelelő pontosságot nyújtanak, azonban a mérések kivitelezése sokszor igen költséges, és emberi erőforrás igényes. A mérések számának ritkításával korlátozni lehet a költség- és erőforrás igényeket, viszont ez a megoldás potenciálisan a felszíni elmozdulások alulmintavételezéséhez vezet.

A műholdas SAR (Szintetikus Apertúrájú Radar) felvételben tartalmazott fázisinformáció interferometrikus feldolgozásával (röviden InSAR) a Föld felszínén bekövetkezett elmozdulások megfigyelése is lehetséges. InSAR módszerrel azonban csak a műhold irányú, ún. line-of-sight (LOS) elmozdulás határozható meg és a LOS elmozdulások is csak relatív értelemben. A módszer egy másik korlátja, hogy az elmozdulások meghatározásához szükséges terepi szórópontok jelenléte. Amennyiben ilyen szórópontok nem találhatók meg a vizsgált területen, mesterséges szórópontokat kell telepíteni.

Az InSAR módszer hatékonyságát egy példa alkalmazáson keresztül demonstrálom: az ukrajnai Aknaszlatina településre meghatározott InSAR elmozdulások alapján modellezést végeztem el a meg-

Geomatikai Publications Közlemények in Geomatics

[*]HUN-REN FI, 9400 Sopron, Csatkai u. 6-8.
E-mail: bozso.istvan@epss.hun-ren.hu

*határozott elmozdulások felszín alatti forrásainak paraméterbecslésére. Ezután bemutatom az ESA PECS (*Integrated Sentinel-PSI and GNSS technical facilities and procedures for the determination of 3D surface deformations ca- used by environmental processes*; 4000114846/15/NL/ND) és az NK-FIH NKP (*Magyarország szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképének megalkotása és elemzése*; 2018-1.2.1- NKP-2018-00007) projektek keretén belül kifejlesztett új módszert, az ún. ISIGN módszert, mellyel kombinálni lehet a „klasszikus" geodéziai terepi módszerek- és InSAR által meghatározott elmozdulásokat.*

Kulcsszavak: InSAR, GNSS, felszíni elmozdulások, sarokreflektor, Kálmán-szűrés

A doktori eredetije elérhető a `https://doi.org/10.15476/ELTE.2023.105` linken. Jelen dokumentum az eredetihez képest tartalmazza helyesírási hibák és elgépelések javítását, illetve tartalmaz néhány apróbb, könnyebb megértés segítő módosítást.

1 Bevezetés

A Föld felszínén tapasztalható elmozdulások vagy deformációk pontos térképezése és monitorozása a XXI. századra kiemelt fontosságú tevékenységgé vált nem csak az alapkutatási, hanem mérnökgeológiai, várostervezési, környezetvédelmi, katasztrófa megelőzési szempontból is. A földfelszín deformációját számos felszínen és felszín alatt zajló, természetes eredetű folyamat alakítja, pl.: földrengés, földcsuszamlás, suvadás, erózió, vulkanizmus; emellett okozhatja emberi eredetű (antropogén) tevékenység is, pl.: bányászati tevékenység, szénhidrogén kitermelés, talajvíz kitermelés, földalatti energiatározás.

A felszíni elmozdulások monitorozásával lehetőség nyílik a különböző természeti katasztrófák jobb megértésére, pl. törésvonalak, lemezhatárok mentén feszültségfelhalmozódás megfigyelése, földcsuszamlás esetén a felszínmozgások követése, kitörés előtt a vulkán „felfúvódása". A különböző felszín alatti kitermelési folyamatok (ivóvíz, szénhidrogén, geotermikus energia) okozta felszíni elmozdulások nyomonkövetésével pedig optimalizálható a termelési folyamat, csökkenthetők a kitermeléssel járó kockázatok.

Napjainkra a már „klasszikusnak" mondható helymeghatározási módszerek (háromszögelés, szintezés, GNSS-mérések) mellett megjelentek távérzékelésen alapuló relatív helymeghatározási eljárások is, pl. felszínen elhelyezett, repülőgépre vagy drónra erősített eszközzel végzett lézeres távolságmérés, műholdas radarinterferometria. Fontos megjegyezni, hogy az új eljárások nem helyettesítik, hanem kiegészítik a már létező módszereket.

Ebben a fejezetben áttekintem a GNSS mérések és radarinterferometria alkalmazásának történeti hátterét, összefoglalom a műholdas radarinterferometria elméletét, és a módszer alkalmazásának korlátait.

1.1 Történeti áttekintés

A földfelszín változásának nyomon követése sok évszázados múltra tekint vissza, és szorosan összekapcsolódik a földmérés, a geodéziai helymeghatározás elméletének és gyakorlatának fejlődésével. Földmérési tevékenységet már az ókorban is folytattak, pl. az ókori egyiptomiak egy adott hosszúságú kötelet, amin egyenlő lépésközzel helyeztek el csomókat, használtak a piramisok és egyéb emlékművek alapzatának, vagy termőföldek területének meghatározásához (lásd Robillard et al. 2011).

A földmérés során elérhető pontosság igazán a XVI-XVIII. században indult növekedésnek, az újabb és pontosabb mérőeszközök feltalálásával és elterjedésével. Willebrord Snellius, XVII. századi holland csillagász és matematikus, a háromszögelés alkalmazásával meghatározta Alkmaar és Breda közötti távolságot. A XVIII. század végére már egész országok területére hoztak létre háromszögelési hálózatokat.

A háromszögelési alappontok a technológiai fejlődéssel kikerültek a világűrbe. Az űrtechnológia fejlődésével lehetségessé vált nagyszámú műhold pályára állítása, a műholdpályák precíz kontrollálá-

sa. A 1960-as években az Amerikai Egyesült Államok haditengerészete fejlesztette ki az ún. TRANSIT műholdrendszert a ballisztikus rakétákkal felszerelt atomtengeralattjárók pozíciójának meghatározására. Az Amerikai Egyesült Államok Légiereje 1978-ban bocsájtotta pályára a Global Positioning System (GPS) rendszer első prototípus műholdját. A GPS rendszer több műholddal kiegészülve sokkal pontosabb helymeghatározást tett lehetővé globális lefedettséggel.

A XXI. századra lehetőség nyílt különböző távérzékelési technikák alkalmazására a földmérésben (pl. terepen elhelyezett, drónra vagy repülőgépre erősített lézeres távolságmérő (Lidar, Light Detection and Ranging) eszköz felhasználásával).

Fontos megjegyezni, hogy a fent említett módszereket elsősorban helymeghatározásra, vagy a földfelszín alakjának meghatározására fejlesztették ki, azonban a felszíni deformációk méréséhez elengedhetetlen a pontos felszíni helymeghatározás. Ismételten elvégzett mérési kampány kivitelezésével és azok eredményeinek összehasonlításával vizsgálható a felszínen végbement elmozdulás nagysága és iránya. A felszínen található stabil, tehát nem deformálódó, pontok pedig referenciaként szolgálhatnak deformációval érintett pontok számára.

A dolgozatban egy olyan modern távérzékelési technikát, az ún. radarinterferometriát, mutatok be, aminek alkalmazásával lehetséges nagy pontossággal felszíni elmozdulásokat (relatív értelemeben) meghatározni, terepen elvégzett mérések nélkül. A bemutatott távérzékelési technika nem alkalmas a terepi mérések kiváltására, azonban az alkalmazásával a szükséges terepi mérések gyakorisága jelentősen csökkenthető. A bevezetőben egy rövid ismertető után részletezem a radarinterferometria elméletét, módszertanát, és technika korlátait.

1.2 A távérzékelésről

Általánosságban a távérzékelés alatt egy olyan vizsgálati módszert értünk, mellyel nem-destruktív módon lehet vizsgálni egy céltárgyat. Távérzékelési technikát alkalmazhatunk akkor, amikor a vizsgálati tárgyhoz vagy nem férünk hozzá, így nem tudunk valamilyen közvetlen módszerrel mérést végezni, vagy túl költséges, esetleg időigényes, lenne a közvetlen mérés elvégzése. A legtöbb esetben a távérzékelési technika gyakorlati megvalósítása során valamilyen közeg választja el a mérőműszert a céltárgytól. Aktív távérzékelés során a műszer valamilyen közegben terjedő hullámot (elektromágneses, rugalmas) bocsájt ki, mely a közegben terjedve eléri a céltárgyat a céltárggyal kölcsönhatva visszaverődik, majd a visszaérkezve a műszerhez, a műszer regisztrálja a visszavert jelet. Passzív távérzékelés esetén a közegben terjedő hullám valamilyen „külső" forrásból származik. A kibocsájtott és érzékelt jelet összehasonlítva információt szerezhetünk a céltárgy felszínének visszaverési karakterisztikájáról, vagy a műszer-céltárgy közötti távolságról, amennyiben ismert a közegbeli hullámterjedés sebessége.

A legtöbb esetben a kibocsájtott hullám valamilyen frekvenciával vagy frekvencia tartománnyal rendelkező elektromágnes jel, a közeg, amiben terjed, pedig a Föld atmoszférája, ionoszférája, a világűr, vagy a talaj, esetleg a földkéreg, litoszféra.

Az elektromágneses spektrum mikrohullámú tartományára (1–100 GHz) épülő távérzékelés kezdete a második világháború idejére datálható. A harcban álló felek közül az Egyesült-Királyság, az Amerikai Egyesült Államok alkalmazott ún. RADAR (Radio Detection and Ranging, továbbiakban radar) technikát ellenséges vadászgépek és bombázók azonosítására és távolságuk becslésére (Skolnik 2002). A szövetséges hatalmakkal párhuzamosan Németországban (Brown 1999) és a Szovjetunióban (Cherneyak et al. 2003) is zajlottak radar fejlesztések és alkalmazások. Fontos megemlíteni, hogy a háború alatt magyarországi mérnökök nem csak fejlesztettek, hanem gyártottak és telepítettek radar állomásokat. A hazai radartechnológiai fejlesztések és alkalmazások egy 1946. február 6-ai kísérletben csúcsosodtak ki. Dr. Bay Zoltán és munkatársai sikeresen meghatározták a Föld-Hold távolságot a „Sas" radar segítségével (Balajti és Hajdú 2016; Galati és Genderen 2016).

1.3 A műholdas távérzékelés

Az űrkutatás és űrtevékenység hajnala a második világháborút követő hidegháborúhoz köthető. Az űrverseny kezdetén a Szovjetunió, az USA-t megelőzve, először állított pályára műholdat (Szputnyik-1, 1957), és valósított meg emberes űrrepülést (Yuri Gagarin, 1961). Az USA 1969-ben az Apollo-11 missziót megvalósítva (Neil Armstrong, Edwin Aldrin, Micheal Collins) sikeresen juttatott embert a Holdra, ezzel átvéve a vezetést a Szovjetuniótól. A Szovjet- és az USA / Nyugati-blokk között kialakult űrverseny egyre fejlettebb és fejlettebb hordozórakéták, űreszközök, műholdak és távérzékelési technikák szélesebb körű, elsősorban katonai, alkalmazásához vezetett.

A műhold, mint földkörüli pályán keringő platform, az 1.1. fejezetben már említett helymeghatározási alkalmazásokon túl, lehetőséget biztosít ún. földmegfigyelési alkalmazásoknak is. A Föld felszínét és atmoszféráját a műholdra szerelt távérzékelési műszerrel lehet megfigyelni. A TIROS (1960-as évek, Neeck et al. 2005; Vaughan és Johnson 1994) programban alacsony Föld körüli pályára (LEO, Low Earth Orbit) állítottak műholdakat, melyeket egy „egyszerű" televíziós kamerával szereltek fel. A program bizonyította, hogy a műholdas megfigyelések képesek hasznos információt szolgáltatni a Föld atmoszférájában végbemenő időjárási folyamatokról.

A TIROS programot számos további sikeres földmegfigyelő műholdprogram követte (Landsat program, POES - Polar Orbiting Environmental Satellite, Metop - Meteorological Operational satellite). A felsorolt programok műholdjain hordozott eszközök vagy az elektromágneses spektrum látható tartományán, vagy látható tartományhoz közel (infravörös, ultraibolya) egy-egy kijelölt frekvencia sávban vizsgálták vagy vizsgálják a Föld felszínét, légkörét. A legtöbb látható tartományban működő műholdas eszköz, egy külső forrásból érkező elektromágneses sugárzás földfelszínről visszaverődött komponensének regisztrálásával képezi le a földfelszínt. Az elektromágneses hullámok külső forrása az esetek túlnyomó részében a Nap. Ez azt is jelenti, hogy csak kizárólag a nappali oldalon készíthetőek felvételek a Föld felszínéről, kivételt képeznek a Föld saját termális infravörös sugárzását figyelő űreszközök. További korlátozó tényező, ha felhőtakaró fedi el a földfelszínt, ami részben vagy teljesen megakadályozza a földfelszínről visszavert látható tartományú elektromágneses sugárzás eljutását a műholdig.

A fent említett korlátozó tényezők kiküszöbölésére egy aktív, mikrohullám frekvencia-tartományban működő távérzékelési technikát fejlesztettek ki, amit a következő fejezetben mutatok be.

1.4 Szintetikus Apertúrájú Radar távérzékelés

Az elektromágneses spektrum mikrohullámú frekvencia-tartományát használó aktív földmegfigyelési technika sok szempontból előnyösebb a látható tartományú földmegfigyeléssel szemben. Az űreszköz maga bocsájtja ki a távérzékeléshez szükséges elektromágneses hullámot, így bármilyen megvilágítási körülmények között (bármely napszakban) képes a Föld megfigyelésére. A mikrohullámú jelek sokkal kisebb mértékben csillapodnak az atmoszférán áthaladva, mint a látható tartományú elektromágneses jelek, tehát a felhőtakaró jelenléte nem akadályozza a földmegfigyelést.

Az aktív mikrohullámú távérzékelés hátránya, hogy az űreszköz elektromos energiafelvételének igénye sokkal nagyobb, mivel a műholdon található antennának kell kibocsájtania a földfelszínről visszaverődő jelet. Ez a probléma azonban nagyobb teljesítményű napelemek alkalmazásával és a műhold megfelelő tervezésével orvosolható. Komolyabb kihívás a mikrohullámú tartományban készült felvételek felszíni felbontása.

A probléma megértéséhez vizsgáljuk meg egy műholdra erősített antenna felvételezési geometriáját, melyet az 1.4.1a. ábra mutat be, és vezessünk be néhány alapfogalmat. A műhold haladási irányát és annak földfelszíni vetületét nevezzük repülési- vagy *azimut* iránynak. A haladási irányra merőlegesen kibocsájtott elektromágneses impulzus terjedésének iránya az ún. keresztirány, angolul *slant range*, aminek a földfelszíni vetülete az ún. felszíni keresztirány, angolul *ground range*. (lásd 1.4.1b. ábra).

Egy négyszög alapú antenna felszíni „lábnyomának" azimut- (W_a) és slant range (Δ_r) irányú

felbontása, harmonikus elektromágneses jelet feltételezve, következőképpen számolható (Hanssen 2001):

$$W_a = \frac{\lambda}{L_a} R \tag{1.4.1}$$

$$\Delta_r = \frac{c\tau}{2} \tag{1.4.2}$$

ahol,

- λ az elektromágneses hullám hullámhossza,
- L_a az antenna szélessége,
- R az antenna és a visszaverő felület távolsága,
- τ az antenna által kibocsájtott elektromágneses impulzus időtartama,
- c a közegbeli fénysebesség.

Egy LEO pályán keringő műhold paramétereivel számolva ($L_a \approx 1$ m, $R = 800$ km, $\lambda = 5.5$ cm) az azimut és slant range irányú felbontásra nagyságrendileg 5–10 km becsülhető az (1.4.1) és (1.4.2) egyenletek felhasználásával. Ez az ún. valós apertúrájú radar (angol irodalomban Real Aperture Radar, RAR) felszíni felbontása. Amennyiben nem lehetne javítani a felszíni felbontás nagyságrendjén, a RAR alapú távérzékelés meglehetősen korlátozottan lenne használható földfizikai alkalmazásokra.

A slant range irányú felbontás növelhető ún. chirp jel alkalmazásával. A chirp jel egy olyan harmonikus jel, melynek az idővel lineárisan nő a frekvenciája: $e(t) = A \exp\left(-i2\pi f(t)t\right)$. Ekkor a slant range irányú felbontás a következőképpen számítható (Hanssen 2001):

$$f(t) = at \tag{1.4.3}$$

$$B_{\mathrm{R}} = a\tau \tag{1.4.4}$$

$$\Delta_r = \frac{c}{2B_{\mathrm{R}}}, \tag{1.4.5}$$

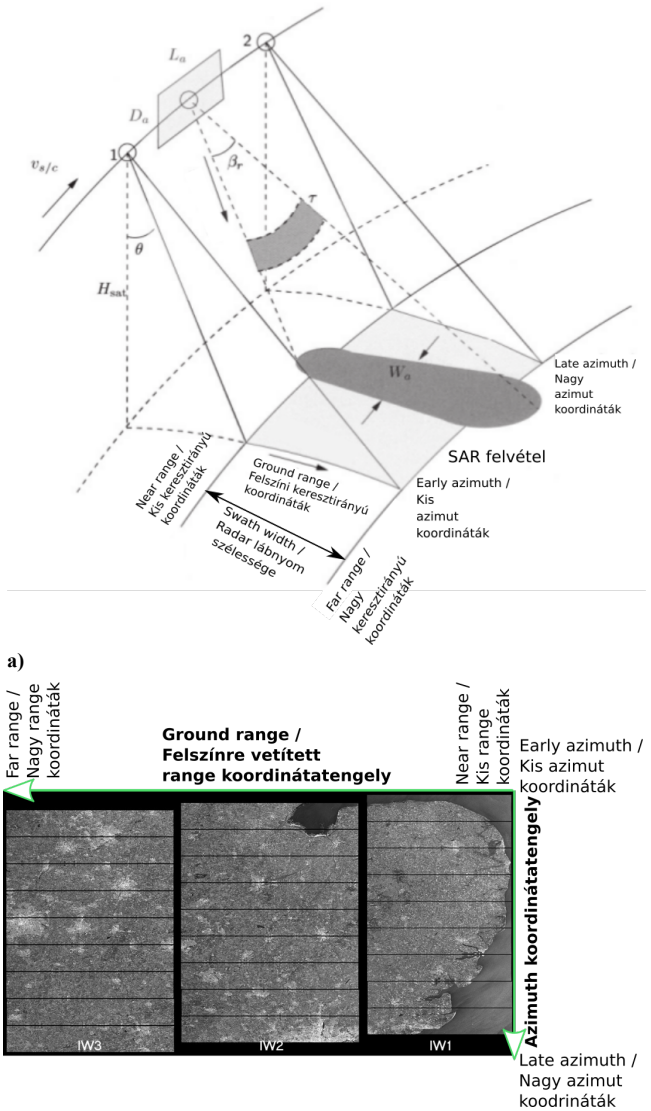
ahol, B_{R} a kibocsájtott jel sávszélessége, a a frekvencia időbeli változásának sebessége. Ezzel a módszerrel elérhető több nagyságrenddel jobb slant irányú felbontás: $\Delta_r \approx 1{-}10$ m.

Egy radar antenna képes több ezer elektromágneses impulzust kibocsájtani egy másodperc alatt. Ahogyan az antenna elhalad egy vizsgált céltárgy felett, a céltárgyat több ezer mikrohullámú impulzussal „világítja" meg. A visszavert jel kétutas futásidejét és a Doppler-eltolódását felhasználva elkülöníthetők egymástól az impulzusok. A Doppler-eltolódás mértéke az áthaladás ideje alatt folyamatosan változik, a céltárgyról visszaérkező elektromágneses impulzusok frekvenciája minden egyes visszaverődés esetén más lesz, ami lehetővé teszi egy nagy sávszélességű jel előállítását az egymást követő impulzusok kombinálásával, az azimut irányban. Ezzel a nagy sávszélességű jellel a range irányhoz hasonlóan méteres nagyságrendű azimut irányú felbontás érhető el. Ennek egy szemléletes megfogalmazása: a valós méretű antenna a céltárgy felett áthaladva egy km-es apertúrájú antennát „szintetizál".

A nyers impulzus adatokból különböző jelfeldolgozási módszerekkel, tehát egy jóval finomabb felbontású radarfelvétel állítható elő. Ezt a mikrohullámú képalkotási módszert nevezik Apertúraszintézisű Radarnak vagy Szintetikus Apertúrájú Radarnak (angol irodalomban *Synthetic Aperture Radar*, továbbiakban SAR) távérzékelésnek.

Egy SAR műhold radar antennája által kibocsájtott jel tehát egy olyan harmonikus jel, melynek időben változik a frekvenciája, amivel elérhető a felszíni felbontás növelése. A legkisebb és legnagyobb frekvencia meghatároz egy középfrekvenciát és sávszélességet. A középfrekvencia valamilyen mikrohullámú tartományba eső frekvencia ($1{-}10$ GHz), a sávszélesség tipikusan néhány 100 MHz. A középfrekvencia szerint további sávokat különíthetünk el a mikrohullámú frekvencia-tartományon belül. SAR műholdak esetén három sávot szoktak meghatározni. A három sáv nevét, frekvencia- és hullámhossz-tartományát, illetve leírását az 1.4.1. táblázat tartalmazza.

A nyers impulzus adatokból, a fent bemutatott módon, ún. fokuszálással lehet előállítani a SAR radarképet. A fokuszált radarképet az angol irodalom Single Look Complex képnek (továbbiakban SLC) nevezi. Fontos megemlíteni, hogy a felvételezés során nem csak a felszínről visszavert impulzus



1.4.1. ábra. A SAR felvételezés geometriájának sematikus ábrája Hanssen 2001 és *Ship Monitoring from Space: SUEZ* é. n. alapján adaptálva, b) egy Sentinel-1 IW SLC-ből származtatott intenzitásképpel (*Ship Monitoring from Space: SUEZ* é. n.). Az a) ábrán D_a és L_a a műholdon hordozott antenna dimenzióit jelölik, H_{sat} a műhold referencia felülettől számított magassága. A sötétszürkével jelölt terület egy kibocsátott mikrohullám felszíni „lábnyomát mutatja" (az a terület, melyet „megvilágít" a kibocsájtott jel). W_a a mikrohullámú jel lábnyomának szélessége, τ az elektromágneses impulzus időtartama. A Sentinel-1 SLC-en belül 3 ún. swath található (IW1, IW2, IW3), melyek további ún. burst elemekre tagolhatók (lásd 1.4.1b. ábra). A swath-on belüli burst elemek részben átfednek egymással

Mikrohullám sáv	**Frekvancia,** f **[GHz]**	**Hullámhossz,** λ **[cm]**	**Leírás**
L-sáv	1–2	30–15	Lombkoronán tipikusan nem verődik vissza. Kevésbé részletes felszíni felbontás, felszíni deformációkra kevésbé érzékeny. pl. ALOS PALSAR műhold (Laurencelle é. n.) Biomassza és vegetáció térképezése, radarinterferometria (földrengések, vulkanizmus).
X-sáv	8–12	3.8–2.4	Lombkoronán nem hatol át, visszaverődik róla. Kiváló felszíni felbontás, felszíni deformációra érzékeny. pl. TerraSAR-X és TanDEM-X műholdak (Kramer é. n.) Városi területek deformációjának monitorozása, jég és hótakaró mozgásának vizsgálata.
C-sáv	4–8	7.5–3.8	Lombkoronába behatol. Közepes felbontás, felszíni deformációra közepesen érzékeny. pl. Sentinel-1 műholdak (*SAR Instrument - Sentinel-1 SAR Technical Guide - Sentinel Online - Sentinel Online* é. n.) Sokrétű interferometrikus alkalmazások - természetes eredetű és emberi tevékenységhez köthető felszíni mozgások megfigyelése, termés fejlődésének monitorozása, árvízzel sújtott területek térképezése.

1.4.1. táblázat. A műholdas SAR távérzékelésnél alkalmazott sávok, frekvencia- és hullámhossz tartománya, és mikrohullámú jel jellemzőinek és alkalmazásoknak a rövid leírása

amplitúdóját regisztrálja a műhold antenna, hanem a jel fázisát is.

Egy SLC felvétel egy komplex számokból álló mátrixként értelmezhető, ahol a komplex szám amplitúdója és fázisa a földfelszínről visszavert és a műhold által regisztrált elektromágneses radarhullám amplitúdójával és fázisával egyezik meg. Az adatok a felvételezés geometriájában (1.4.1b. ábra), az ún. (ground) range-azmiut geometriában vannak eltárolva. (A range adatpontok száma megegyezik a mátrix oszlopainak számával, és az azimuth adatpontok száma megegyezik a mátrix sorainak számával.)

1.4.1 A Sentinel-1 műholdpár

A Copernicus földmegfigyelő program keretén belül az Európai Űrügynökség (European Space Agency, ESA) több földmegfigyelő műholdat is pályára állított melyek a Sentinel elnevezést viselik. A Sentinel műholdak az elektromágneses spektrum különböző tartományain készítenek felvételeket a földfelszínről és vizsgálják a Föld légkörének állapotát. A Copernicus program az Európai Unió űrprogramjának részeként Európai Bizottság vezetésével az ESA, a tagállamok és számos európai ügynökség (EUMETSAT, ECMWF) közreműködésével valósul meg.

A Sentinel-1 A és B műholdak, a Copernicus program földfelszínt C-sávban térképező SAR műholdjai. (A felbocsájtások dátumai: Sentinel-1A 2014.05.03., Sentinel-1B 2016.05.25.) A Sentinel-1 műholdak jelentős előrelépést jelentenek a korábbi C-sávban működő ESA SAR műholdak műholdakhoz képest (ERS-1, ERS-2, Envisat), mivel sokkal konzisztensebben szolgáltatnak SAR felvételeket a Föld felszínéről, jelentősen nagyobb területet fednek le egy felvétellel, illetve a földfelszín egy adott területéről sokkal gyakrabban készül felvétel. Az ERS-1/2 és Envisat műholdak esetén a visszatérési idő kb. 30 nap vagy annál nagyobb időperiódus volt.

A Sentinel-1B műhold meghibásodása és a meghibásodott műhold missziójának lezárása előtt a műholdpár 6 naponta fedte le felvételekkel Európát, és 12 napos vagy annál nagyobb visszatérési idővel készített felvételeket a földfelszínről és további kiválasztott területekről (Alpi-Himalája hegység-

öv, aktív vulkánnal rendelkező területek és szigetek, lásd *Sentinel-1- Observation Scenario - Planned Acquisitions - ESA - Sentinel Online* é. n.).

1.4.2 A Sentinel-1 SLC felvételek

Négyfajta Sentinel-1 SLC felvétel típus létezik, melyek mind eltérő felszíni felbontással és felszíni lefedettséggel rendelkeznek (Stripmap (SM), Interferometric Wide Swath (IW), Extra Wide Swath (EW), Wave (W). A különböző SLC típusokról bővebben *User Guides - Sentinel-1 SAR - Acquisition Modes - Sentinel Online - Sentinel Online* é. n. dokumentumban lehet tájékozódni). Az interferometrikus feldolgozás szempontjából az IW SLC produktumok a legoptimálisabbak. Az IW SLC egy Level-1-es termék, mely számos meta-adaton túl tartalmazza magát a SAR felvételt, melyet a nyers adatokból fokuszálással állít elő a műholdat működtető űrügynökség, az ESA.

A Sentinel-1 SLC-en belül 3 ún. swath található (IW1, IW2, IW3), melyek további ún. burst elemekre tagolhatók (lásd 1.4.1b. ábra). A swath-on belüli burst elemek részben átfednek egymással.

1.5 A szintetikus apertúrájú radarinterferometria

A SAR képek intenzitás (az amplitúdó négyzete) adatainak rendkívül sok felhasználása ismert (erdővel borított területeken jégvihar okozta károk becslése - Zoltán et al. 2021, árvíz sújtotta városi területek vizsgálata - Li et al. 2019, terménynövények osztályozása - Xu et al. 2018). Ahogyan korábban említettem a SAR felvételek nem csak a földfelszínről visszavert mikrohullám intenzitását, hanem a fázisát is tartalmazzák. A fázis információ, pontosabban két SAR felvétel fázisértékeinek különbsége, pedig további alkalmazásokra ad lehetőséget. Az egyik legelterjedtebb felhasználása a fáziskülönbségeknek a felszíni deformációk megfigyelése a felvételek ún. interferometrikus feldolgozásával.

A természetben előforduló és emberi tevékenység által gerjesztett hullámok (pl. elektromágneses, rugalmas) konstruktív és destruktív módon léphetnek interferenciába egymással. Azt, hogy az interferencia konstruktív vagy destruktív a két hullám fáziskülönbsége határozza meg. Fáziskülönbséget két hullám között előidézhetünk pl. úgy, hogy az egyik hullámot hosszabb úton juttatjuk el az interferenciának teret adó térrészhez. Ekkor a két hullám fáziskülönbsége arányos lesz a megtett utak különbségével. Az egyik leghíresebb fizikai kísérlet, mely az ún. „éter", (a közeg, melyről azt feltételezték, hogy az elektromágneses hullámok terjedését teszi lehetővé), létezését vizsgálta, a Michelson-Morley kísérlet (Shankland 1964) is ezt az elvet használta ki.

Egyetlen SAR felvétel fázisképe nem szolgál hasznos információval (1.5.1a és b ábrák). A SAR felvétel egy adott pixelének fázisa (ϕ) arányos a műholdpozíció és a pixelhez tartozó felszín távolságával (R):

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} R, \tag{1.5.1}$$

ahol λ a hullámhossz. C-sávú mikrohullámú jelet alkalmazó és LEO pályán keringő SAR műholdat feltételezve ($\lambda \approx 5\,\text{cm}$, $R = 700{-}1000\,\text{km}$), tekintve, hogy fázis 2π radiánonként periodikus ez több millió ciklust jelent. Figyelembe véve az egyéb zajforrásokat elmondható, hogy egyetlen kép fázisa véletlenszerűnek tekinthető, hasznos információ nem nyerhető ki belőle.

Ha azonban két SAR felvétel fázisértékeinek különbséget képezzük a fáziskép már nem lesz véletlenszerű (1.5.1c. ábra). Két SAR felvétel fáziskülönbségéből képzett képet nevezzük interferogramnak, melyet a következőképpen számíthatunk:

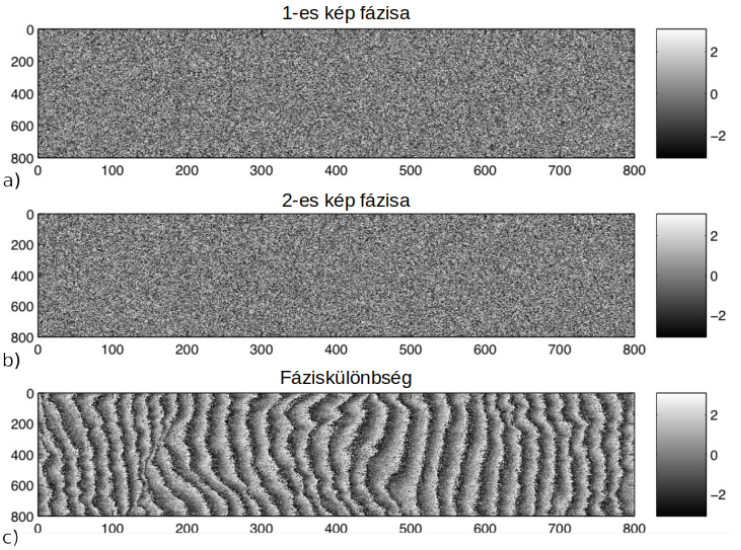
$$C_{\text{IFG},ij} = C_{m,ij} C^*_{s,ij} \tag{1.5.2}$$

$$= A_{m,ij} \exp\left(i\phi_{m,ij}\right) A_{s,ij} \exp\left(-i\phi_{s,ij}\right) \tag{1.5.3}$$

$$= A_{m,ij} A_{s,ij} \exp\left(i(\phi_{m,ij} - \phi_{s,ij})\right), \tag{1.5.4}$$

ahol,

- i alsóindex egy felvétel i-ik sorát jelöli,



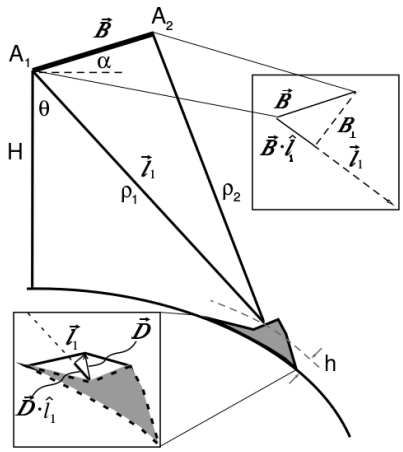
1.5.1. ábra. Két SAR felvétel fázisainak értékei (a és b ábra) és a két felvétel fázisának különbségei (c ábra, az a ábrán látható felvétel fázisértékei kerültek kivonásra a b ábrán látható felvétel fázisértékeiből). A színskála $[-\pi, \pi]$ tartományon tartalmazza a fázis értékét radián egységben (módosítva Bürgmann et al. 2000 alapján)

- j alsóindex egy felvétel j-ik oszlopát jelöli,
- m alsóindex az ún. mester (az angol irodalomban *master*, *main* vagy *reference*) felvételt jelöli,
- s alsóindex az ún. szolga (az angol irodalomban slave, vagy secondary) felvételt jelöli,
- C^*_{ij} az i-ik sorban és j-ik oszlopban található SAR képben tárolt komplex szám konjugált értéke,
- C_{ij} egy SAR felvétel egy pixelének komplex számérte,
- $C_{\mathrm{IFG},ij}$ az interferogram egy pixelének komplex, számérte,
- A a SAR felvétel amplitúdó értéke,
- ϕ a SAR felvétel fázis értéke.

Az interferogram maga is egy komplex számokból álló mátrixként értelmezhető. Az interferogram komplex számértékeinek amplitúdója a két eredeti SAR felvétel amplitúdóinak szorzata, a fázisa a két SAR felvétel fázis-értékeinek különbsége, melyet interferometrikus fázisnak vagy az interferogram fázisának nevezünk (angol irodalomban *interferometric phase* és *interferogram phase*). Ugyan a legtöbb esetben az interferogram fázis-értékeiből lehet információt kinyerni, az amplitúdó-értékek is információval szolgálhatnak, pl. SAR felvételek sorozatát tekintve, egy adott pixel amplitúdó-értékeinek szórása arányos a pixel fázisának szórásával (Ferretti et al. 2000).

Az interferogramon látható mintázat már nem véletlenszerű, az értelmezéséhez meg kell vizsgálnunk a két SAR felvételhez tartozó műholdpozíciók geometriai tulajdonságait a földfelszín egy kiválasztott pontjának vonatkozásában.

Két SAR felvételhez tartozó műholdpozíciót mutat be az 1.5.2. ábra. A két SAR felvétel készülhet azonos időpontban, amennyiben rendelkezésre áll egy műholdpár, melyek „tandemben” haladnak el a vizsgált terület felett. A két felvételt készítheti egy műhold is, amely különböző időpontokban halad el a vizsgált terület felett, vagy egy műhold, melyen két antennát helyeznek el. A két műholdpozíció közül a referencia pozíciót szokás mester pozíciónak, a hozzá tartozó képet mester képnek nevezni (angol irodalomban *master* vagy *primary image*). A másik műholdpozíció a szolga műholdpozíció és a hozzá tartozó felvétel pedig a szolga felvétel (angol irodalomban *slave* vagy *secondary image*). Egy adott pixelhez tartozó interferometrikus fázis, a mester kép és a szolga felvételhez tartozó műholdpozíciók és a pixelhez tartozó felszíni felbontási cella közötti távolságok ($\rho_{1,2}$) különbségével arányos (Bürgmann



1.5.2. ábra. Két SAR felvétel esetén a mikrohullámú jel terjedési útvonala a különböző műholdpozícióktól a felszín egy kiválasztott pontjáig. H a referencia vagy mester SAR felvétel műholdpozíciójának (A_1) referencia felület feletti magassága. $\boldsymbol{B}$ az ún. bázisvonal vektor, a referencia műholdpozícióból a másodlagos vagy szolga műholdpozícióba (A_2) mutató vektor. $\boldsymbol{l_1}$ a referencia műholdpozícióból a vizsgált felszíni pontba mutató egységvektor (line-of-sight, vagy röviden LOS vektor). $B_\perp$ a bázisvonal vektor $\boldsymbol{l_1}$ vektorra merőleges komponense. ρ_1 és ρ_2 a referencia és másodlagos műholdpozíciók és a vizsgált felszíni pont távolsága. $\boldsymbol{D}$ a felvételezés két időpontja között bekövetkezett vizsgált felszíni pont elmozdulásának vektora. h a vizsgált felszíni pont referencia felülettől mért magassága. θ a beesési szög (Bürgmann et al. 2000)

et al. 2000):

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda}(\rho_1 - \rho_2). \tag{1.5.5}$$

Zebker és Goldstein 1986 munkája alapján a távolságkülönbséget ki lehet fejezni a merőleges bázisvonallal és az ún. line-of-sight (továbbiakban LOS) vektorral:

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda}\rho_1 \left[\left(1 - \frac{2\boldsymbol{B}\boldsymbol{l_1}}{\rho_1} + \frac{B^2}{\rho_1^2} \right)^2 \right] \tag{1.5.6}$$

A merőleges bázisvonal vektor a mester műholdpozícióból a szolga műholdpozícióba mutató vektor, a LOS vektor, pedig a referencia műholdpozícióból a vizsgált felszíni pontba mutató egységvektor.

Feltételezve, hogy $|\boldsymbol{B}| \ll \rho_{1,2}$ a interferogram fázisra kapott kifejezés tovább egyszerűsíthető (Zebker és Goldstein 1986):

$$\phi \approx -\frac{4\pi}{\lambda}(\boldsymbol{B}\boldsymbol{l_1}) = -\frac{4\pi}{\lambda}B_\parallel = -\frac{4\pi}{\lambda}B\sin(\theta - \alpha) \tag{1.5.7}$$

A $\boldsymbol{B}\boldsymbol{l_1}$ szorzat értéke minden egyes pixel esetén más, mivel a $\boldsymbol{l_1}$ minden pixel esetén más irányba fog mutatni. Érdemes bevezetni a h_a (magassági többértelműség, angol irodalomban *height ambiguity*) mennyiséget (Bürgmann et al. 2000):

$$h_a = 2\pi\frac{\partial h}{\partial \phi} = \frac{\lambda\rho_1 \sin\theta}{2B_\perp}. \tag{1.5.8}$$

A h_a, melynek értéke azzal a referencia felszín feletti magasságváltozás értékével egyezik meg, mely a fázisban 2π radián változáshoz, vagyis egy teljes ciklusugráshoz vezet. Egy példa Sentinel-1 SAR felvétel pár esetén:

$$\lambda = 5.55\,\text{cm} \tag{1.5.9}$$

$$B_\perp = 100\,\text{m} \tag{1.5.10}$$

$$\rho_1 = 800\,\text{km} \tag{1.5.11}$$

$$\theta = 23^\circ \tag{1.5.12}$$

$$\Rightarrow h_a \approx 87\,\text{m}. \tag{1.5.13}$$

Amennyiben a két SAR felvétel nem egy időben készül, és a felvételezés két időpontja között eltelt időben a felszínen valamilyen elmozdulás következett ($\boldsymbol{D}$) be, melynek a LOS vektorra vetített komponense nem nulla ($\boldsymbol{Dl_1} \neq 0$), egy újabb tag jelenik meg az interferogram fázisában:

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda}(\phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{defo}}) \approx \frac{4\pi}{\lambda}(-\boldsymbol{Bl_1} + \boldsymbol{Dl_1}), \tag{1.5.14}$$

ahol ϕ_{topo} jelöli a topográfiához köthető, ϕ_{defo} pedig a felszíni deformációból eredő fázistagot. Ha ismerjük a pontos műholdpálya pozíciókat és rendelkezésünkre áll a SAR felvétel által lefedett területre jó felbontású digitális terepmodell (Digital Elevation Model, továbbiakban DEM), ki lehet számítani a $\boldsymbol{Bl_1}$ szorzatot minden pixel esetén, és meg lehet becsülni a topográfiai fázist. A becsült topográfiai fázist kivonva az interferogram fázisából egy ún. differenciális interferogramot kapunk, ami ideális esetben csak a felszíni elmozdulásokból származó fázist tartalmazza.

Fontos megjegyezni, hogy az interferogram fázis nem ugyanolyan mértékben „érzékeny” a topográfiában és felszíni deformációban bekövetkezett változásokra. Az (1.5.8) egyenletek számításánál alkalmazott példa Sentinel-1 felvétel pár paramétereit felhasználva ≈ 87 m topográfiai változás szükséges egy teljes ciklusugráshoz, míg a deformáció esetén elég, ha a felszíni elmozdulás LOS vektor irányú komponense eléri a hullámhossz felét $\boldsymbol{Dl_1} = \lambda/2 = 2.77$ cm. Ez azt is jelenti, hogy a topográfiai fázis becsléséhez nincs szükség nagyon pontos topográfiai modellre, mivel akár $1-5$ m-es hiba a topográfiai modellben, a deformációs fázishoz képest, sokkal kisebb hibát eredményez topográfiai fázis becslésekor.

A differenciális interferogram az esetek túlnyomó többségében nem csak felszíni elmozdulásokhoz köthető fázistagot tartalmazza. A semleges légkör (atmoszféra) állapotában bekövetkezett változás (hőmérséklet, nyomás, vízgőztartalom profil változása) a közegbeli hullámterjedési sebesség változásához vezet, mely hozzáadódik az felszíni elmozdulási fázishoz. Az ionoszférában elsősorban az elektron sűrűség profil változása, az ún. Teljes Elektrontartalomban (angol irodalomban Total Electron Content, továbbiakban TEC) bekövetkezett változás okoz terjedési sebesség változást, ami szintén hozzáadódik a differenciális interferogram fázisához.

Mind a semleges atmoszféra-, mind az ionoszféra állapotának változása által előidézett, a felszíni deformációból eredő fázishoz hozzáadódó interferometrikus fázistag, nagysága függ a mikrohullámú jel atmoszférában „bejárt” útvonalától. Ez azt jelenti, hogy az atmoszférikus fázistagok korrekciójának esetén nem elegendő ismerni az atmoszféra állapotát, azt is meg kell határozni, hogy a felvételezés során a mikrohullámú jel hogyan harántolta az egyes atmoszférikus rétegeket. Ez különösen megnehezítheti a pontos korrekciót, mivel a bejárt útvonal pixelről pixelre változik.

A más adatrendszerből meghatározott ZTD (*zenith total delay*, zenit irányú teljes késleltetés) felhasználható az atmoszférikus hatások korrekciójára. A ZTD méterben adja meg a semleges atmoszféra által előidézett késleltetést, melyet az atmoszférán áthaladva elszenvednek az elektromágneses hullámok, ha a terjedés lokális zenit irányban történt. A ZTD meghatározható meteorológiai adatok alapján (Hopfield 1969; Saastamoinen 1972), vagy számítható GNSS állomások adataiból (Tralli és Lichten 1990). Mivel a jelterjedés iránya nem egyezik meg a zenit iránnyal ezért a ZTD értékeket ún. leképzési függvényekkel a tényleges terjedés irányára vetíteni. Számos leképzési függvény ismert az irodalomból, többek között Hopfield 1969 és Saastamoinen 1972 is dolgozott ki leképzési függvényeket.

Összefoglalva az eddigieket egy differenciális interferogram fázisát Hooper et al. 2012 munkája alapján a következőképpen modellezhetjük:

$$\phi = \phi_{\Delta\text{topo}} + \phi_{\text{defo}} + \phi_{\text{atmo}} + \phi_{\text{iono}} + \phi_{\text{orbit}} + \phi_{\text{zaj}} \tag{1.5.15}$$

ahol,

- $\phi_{\Delta\text{topo}}$ a topográfiai modell (DEM) hibájából származó reziduális fázistag,
- ϕ_{defo} a felszíni elmozdulásból / deformációból származó fázistag,

Fázistag	Térbeli jellemző	Időbeli jellemző
ϕ_{defo}	hosszú hullámhosszú	alacsony frekvenciájú bázisvonallal korrelált
$\phi_{\Delta\text{topo}}$		
ϕ_{atmo}		
ϕ_{iono}		magas frekvenciájú
ϕ_{orbit}		
ϕ_{zaj}	rövid hullámhosszú	

1.5.1. táblázat. A differenciális interferogram fázistagjainak térbeli és időbeli jellemzői Hooper et al. 2012 alapján

- ϕ_{atmo} a semleges légkör (atmoszféra) állapotának megváltozásából származó fázistag,
- ϕ_{iono} az ionoszféra állapotának megváltozásából származó fázistag,
- ϕ_{orbit} a műholdpálya adatok pontatlan ismeretéből származó fázistag,
- ϕ_{zaj} az egyéb, nem modellezhető, „zajként” értelmezhető fázistagok.

Amennyiben a felszíni elmozdulásokat kívánunk meghatározni differenciális interferogram alapján, minden nem deformációhoz köthető fázistagot el kell távolítani az interferogramból. Ezt meg lehet tenni az adott fáziskomponensek modellezésével (pl. Bekaert et al. 2015). Külső, azaz nem SAR adatokból származtatott, adatrendszert felhasználva is becsülhető egy adott fázistag, pl. más műholdas mérésekből következtetni lehet az atmoszféra állapotára és meg lehet becsülni az atmoszférikus fázis nagyságát (Li et al. 2005; Li et al. 2009). Bizonyos esetekben a differenciális interferogramból is lehet becsülni egy fáziskomponens nagyságát, pl. az ionoszférikus fázis komponenst lehetséges becsülni a differenciális interferogram fázisából (Wegmüller et al. 2018).

A továbbiakban a „differenciális interferogram” kifejezés helyett csak egyszerűen az „interferogram” kifejezést fogom használni.

1.6 Interferogramok fáziskicsomagolása

Egy interferogram fázisa 2π radiánonként, vagy 360 fokonként periodikus. Ez azt jelenti, hogy ha van egy térben lineárisan növekvő deformációs jel egy interferogramon belül (lásd 1.6.1. ábra), akkor a jel nem egy lineárisan növekvő jelként fog jelentkezni az interferogram fázisképében, hanem a fázis periodicitása miatt, a fázisban 2π radián nagyságú szakadások lesznek. A tényleges felszíni elmozdulások visszaállításához ezeket a szakadásokat helyre kell állítani, egy szakadásmentes fázisképet kell létrehozni. Ezt a lépést nevezzük fázis-kicsomagolásnak (angol irodalomban *phase unwrapping*, Zuo et al. 2016; Chen és Zebker 2003).

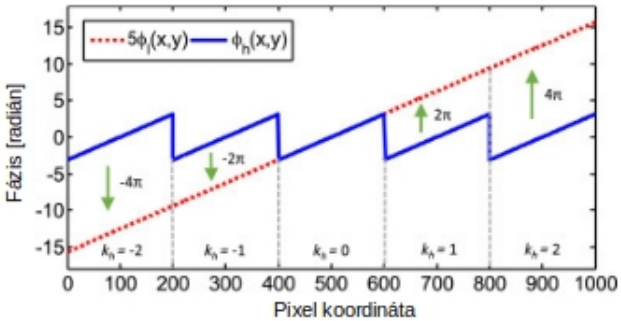
Becsomagolt interferogramnak (angol irodalomban *wrapped interferogram*) nevezzük a 2π radián szakadásokat tartalmazó interferogramot, és kicsomagolt interferogramnak (angol irodalomban *unwrapped interferogram*) a fázis-kicsomagolás eredményeként kapott fázist tartalmazó interferogramot.

Fontos megjegyezni, hogy a fázis-kicsomagolás során kapott kicsomagolt fázis relatív értelemben jellemzi a felszíni elmozdulásokat, ugyanis a kicsomagolás elvégzéséhez ki kell jelölni egy referencia pixelt az interferogramon. A sikeres kicsomagolás után a felszíni elmozdulások a referencia ponthoz képest, továbbá a mester felvétel időpontjához képest értelmezett elmozdulások. Más referencia pixelt kiválasztva más kicsomagolt fázisértékeket és ezáltal más felszíni elmozdulás értékeket kapunk.

A kicsomagolt fázisértékekből a következőképpen határozhatók meg a (relatív) felszíni elmozdulás értékek:

$$\delta_{\text{LOS}} = \frac{\lambda}{4\pi}\phi_{\text{unwr}}, \tag{1.6.1}$$

ahol δ_{LOS} a LOS irányú felszíni elmozdulás, ϕ_{unwr} a kicsomagolt fázis. A SAR felvételek fázisát, és ennek következtében az interferogramok fázisát, rendkívül nagy pontossággal meg lehet határozni. Ez azt jelenti, hogy amennyiben más tényező nem rontja le az interferometrikus fázis koherenciáját (Yan-



1.6.1. ábra. A fázis-kicsomagolás szükségességét demonstráló ábra. Az x-tengely egy interferogram azimut vagy range irányában számított pixelszámot, az y-tengely az interferogram fázisát jellemzi. A becsomagolt fázis (*wrapped phase*) folytonos kék vonallal, a kicsomagolt fázis (*unwrapped phase*) szaggatott vörös vonallal van ábrázolva

jie és Prinet 2004) a LOS irányú felszíni elmozdulásokat rendkívül pontosan, akár szubmilliméteres pontossággal meg lehet határozni (Ferretti et al. 2007).

Az 1.6.2. ábra egy becsomagolt (a. ábra) és kicsomagolt (b. ábra) interferogram párt tartalmaz, melyek Kelet-Magyarországot fedik le. Az interferogram által felölelt időszakban nem történt számottevő felszíni elmozdulás, az interferogram fázis lényegében megegyezik az atmoszférikus fázissal. A képeken látható vörös négyszögek azokat a területeket jelölik, ahol a becsomagolt fázis ún. koherenciája lecsökkent és a kicsomagolási algoritmus hibás kicsomagolt fázist eredményezett.

Az 1.6.3a. ábrán egy kisebb, az 1.6.3b. ábrán egy nagyobb koherenciájú interferogram látható. A koherencia romlásával a fáziskép „zajosabbá" válik és egyre kisebb megbízhatósággal lehet elvégezni a fáziskicsomagolást.

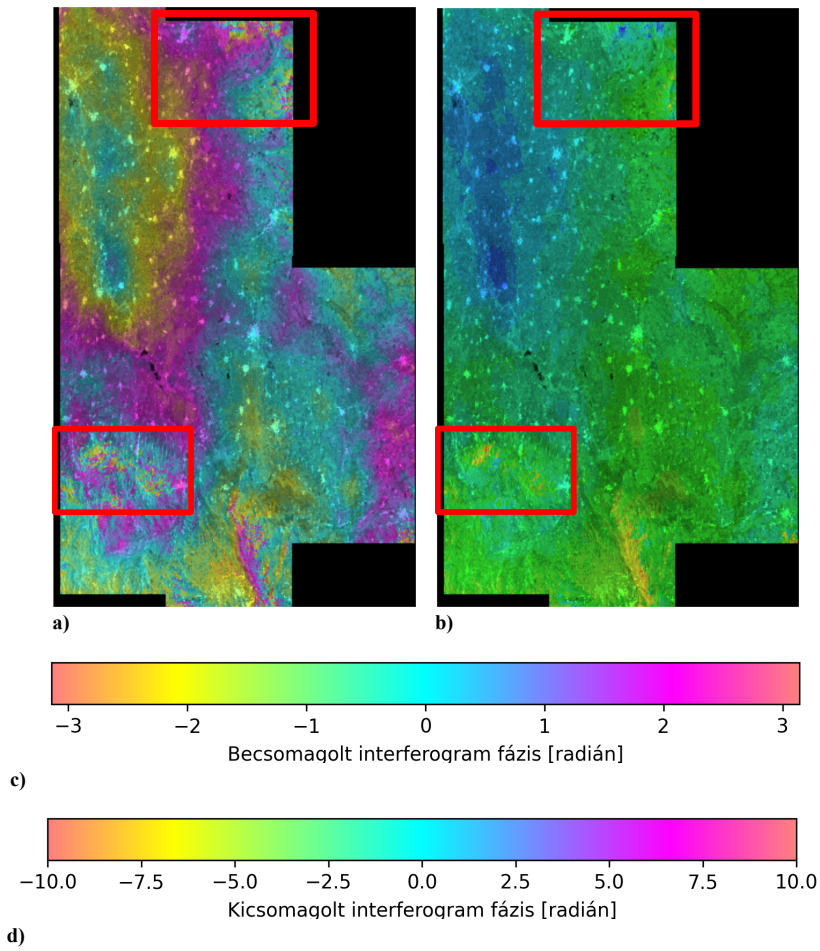
1.7 Interferogramok idősorelemzése

Eddig egyetlen interferogram fázisának komponenseiről és az interferogrammal elvégezhető vizsgálatokról volt szó. Ha azonban nem pusztán egy SAR képpár áll rendelkezésünkre, hanem SAR felvételek sorozata, akkor lehetséges összesen $N(N-1)$ interferogram elkészítése, ahol N a SAR felvételek száma.

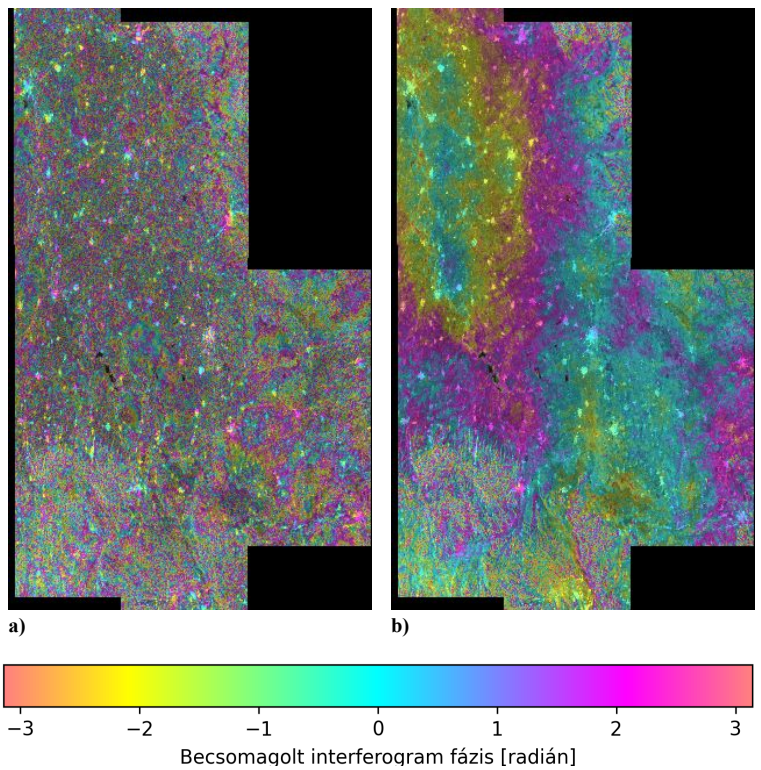
A legtöbb esetben nem érdemes azonban az összes lehetséges interferogramot elkészíteni, ugyanis minél nagyobb két SAR felvétel között az időkülönbség, annál nagyobb mértékben romlik az interferogram fázisának koherenciája. Interferogramok sorozatának feldolgozására kétfajta stratégiát dolgoztak ki.

Az egyik az ún. *Small Baseline Subset* (Berardino et al. 2002, továbbiakban SBAS) feldolgozás. SBAS feldolgozás során olyan interferogramokat hozunk létre, melyek esetén a két interferogramhoz tartozó SAR képek időbeli különbsége és merőleges bázisvonala minimális, így magas koherenciájú interferogramok származtathatók a SAR felvételekből. A feldolgozás során lehetséges ún. elosztott szórópontok (angolul *distributed scatterers*, továbbiakban DS) kiválasztása, nem szükséges az interferogramok összes pixeleinek a feldolgozása. A DS pontok stabil fázissal rendelkező pixelek, melyek koherenciája az összes interferogram esetén magas értékkel rendelkezik. A fáziskicsomagolás és egyéb korrekciós lépések után (atmoszférikus és ionoszférikus fázis eltávolítása) a felszíni deformációk meghatározhatók legkisebb négyzetes kiegyenlítéssel (Berardino et al. 2002).

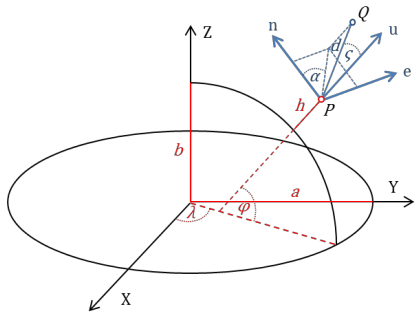
A másik feldolgozási stratégia az ún. perzisztens vagy permanens szórópontok (angol irodalomban *persistent* vagy *permanent scatterer*, továbbiakban PS, Ferretti et al. 2001) kiválasztásán alapul. A PS pontok olyan felszíni szórópontok, melyek esetén a felbontási cellán belül található koherens szórópont beérkező mikrohullámú jelre adott fázisválasza a felbontási cellához tartozó pixel fázisát meghatározza, dominálja. PS-ek tipikusan fém- vagy beton felületek, infrastruktúrához tartozó tereptárgyak, pl. vasúti sínek, épületek, hidak, oszlopok, fatörzsek. A PS-ek koherens fázist biztosítanak hosszú időn



1.6.2. ábra. Kelet-Magyarországot lefedő Sentinel-1 SAR felvételekből származtatott becsomagolt és kicsomagolt interferogram. Az a) a 2016.10.31. és 2016.11.18. napokon készült Sentinel-1 SAR felvételekből származtatott interferogram látható, a b) ábrán a kicsomagolt interferogram. A vörös négyszögek azokat a területeket jelölik, ahol a kicsomagolási algoritmus hibázott



1.6.3. ábra. Kelet-Magyarországot lefedő Sentinel-1 SAR felvételekből származtatott két interferogram. Az a) ábrán a 2016.06.15. és 2016.07.09. napokon, a b) ábrán a 2016.10.31. és 2016.11.18. napokon készült Sentinel-1 SAR felvételekből származtatott interferogram látható. Az a) ábrán látható interferogram kisebb koherenciával rendelkezik mint a b) ábrán látható interferogram, melynek fázisát egy hosszú hullámhosszú atmoszférikus fázis dominálja



1.8.1. ábra. A SAR megfigyelések geometriáját jellemző szögek és koordinátarendszerek. A n, e, u a P ponthoz illesztett ellipszoidi lokális topocentrikus koordinátarendszer tengelyeit jelölik. ζ és α a Q ponttal jelölt áthaladás beesési- és azimut-szögei. φ és λ a szélesség, és hosszúság, h az ellipszoid feletti magasság. a és b az ellipszoid nagy- és kistengelyei. X, Y, és Z az ellipszoidhoz rögzített Föld központú koordinátarendszer tengelyei (Bányai et al. 2017)

keresztül, koherenciájuk nem romlik le nagy időbeli bázisvonal esetén sem. A feldolgozás során a kiválasztott mester képhez képest készülnek el az interferogramok (összesen $N-1$). Ezt követi a PS-hez tartozó pixelek meghatározása, és a PS-által dominált pixelekhez tartozó interferometrikus fázis külön adatfájlokba mentése. Ezután el lehet végezni a fáziskicsomagolást és korrekciós lépéseket de kizárólag a PS-pontok fázisinformációjának felhasználásával. A kicsomagolt fázis felhasználásával az (1.6.1) egyenlet alapján lehet kiszámítani a LOS irányú felszíni elmozdulásokat. A PS feldolgozásnak többfajta megvalósítása is ismert, pl. StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers Hooper et al. 2012), IPTA (Interferometric Point Target Analysis, Werner et al. 2003).

1.8 A Sentinel-1 megfigyelések geometriai jellemzői

A Sentinel-1 műhold közel-poláris napszinkron pályán kering, ami azt jelenti, hogy egy terület felett egyszer ún. felszálló-, másszor leszálló-irányban (angol irodalomban *ascending*, és *descending* direction) halad át. Egy adott felszíni pont és adott áthaladás esetén a műhold irányt, vagy LOS-t, a beesési- (ζ) és azimut (α) szögekkel jellemezhetjük, melyet a lokális n, e, u koordinátarendszerben számíthatunk ki.

Az 1.8.1. ábra egy műhold áthaladás geometriáját mutatja be. A P pont a felszín egy pontja, Q pont a műholdpozíció d a PQ távolság. Ekkor az azimut- és beesési szögeket a következőképpen számíthatjuk ki (Bányai et al. 2017):

$$\begin{bmatrix} n_Q \\ e_Q \\ u_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\varphi\cos\lambda & -\sin\varphi\sin\lambda & \cos\varphi \\ -\sin\lambda & \cos\varphi & 0 \\ -\cos\varphi\cos\lambda & -\cos\varphi\sin\lambda & -\sin\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_Q - X_P \\ Y_Q - Y_P \\ Z_Q - Z_P \end{bmatrix} \tag{1.8.1}$$

$$d = \sqrt{n_Q^2 + e_Q^2 + u_Q^2} \tag{1.8.2}$$

$$\alpha = \tan^{-1}\frac{e_Q}{n_Q} \tag{1.8.3}$$

$$\zeta = \cos^{-1}\frac{u_Q}{d} \tag{1.8.4}$$

Ha tehát ismertek egy felszíni pont és a műholdpozíció WGS-84 koordinátái kiszámíthatjuk az azimut- és beesési szögeket. A lokális topocentrikus koordinátarendszer hasznos továbbá GNSS helymeghatározással megfigyelt felszíni elmozdulások értelmezésénél.

1.9 Magyarországi InSAR alkalmazások

Az InSAR technológia egyik első sikeres magyarországi alkalmazása Petrik Ottó nevéhez fűződik, aki 2007-ben, doktori dolgozatában (Petrik 2007) foglalta össze eredményeit. Azóta számos hazai kutatói és vállalkozói alkalmazásra találhatunk példát.

A Geo-Sentinel cég (Dr. Grenerczy Gyula, Farkas Péter; *About Us - Geo-Sentinel* 2022) InSAR és GNSS technológiák alkalmazásával biztosít precíz felszíni deformációk monitorozását megvalósító szolgáltatásokat. A penci Kozmikus Geodéziai Obszervatórium kollégái (Dr. Kenyeres Ambrus, Magyar Bálint) szintén InSAR alapú felszíni mozgásvizsgálatot végeznek el (Magyar et al. 2021) és Sentinel-1 Geodéziai Alapponthálózatot (*KGO* 2023) tartják fennt. A Pécsi Tudományegyetemen Ronczyk Levente és kollégái pedig felhő alapú InSAR feldolgozási környezetet (Ronczyk et al. 2022) fejlesztenek.

1.10 Mesterséges reflektorok tervezése és vizsgálata

Bizonyos InSAR feldolgozások esetén előfordulhat, hogy nem állnak rendelkezésre a vizsgált területen az elmozdulások meghatározásához szükséges PS-ek. A problémára megoldás lehet ha a vizsgált területre ún. mesterséges reflektorokat telepítünk. Mivel számos reflektor típus létezik, melyek különböző visszaverési karakterisztikákkal rendelkeznek, a megfelelő reflektor típus és geometriai kiválasztása kritikus lépés, melynél figyelembe kell venni a felszíni elmozdulások várható nagyságát, továbbá az InSAR feldolgozáshoz használt SAR műholdak karakterisztikáit (milyen sávban történik a felvételezés, a műhold pálya geometriája).

Ebben a fejezetben az optimális reflektorgeometria kiválasztásához alkalmazott analitikus számítások, numerikus szimulációk és analóg mérések eredményeit, illetve az eredmények alapján meghatározott optimális reflektort mutatom be. Ezek az eredmények egy ESA-PECS (*Integrated Sentinel-PSI and GNSS technical facilities and procedures for the determination of 3D surface deformations caused by environmental processes*; 4000114846/15/NL/NDe) projekt támogatásával jöttek létre. Az itt bemutatott reflektortervezési lépések ugyan nem részei a dolgozat fő részének, azonban elengedhetetlen előfeltételei a fő részben bemutatott eljárás terepi alkalmazásának.

A fejezetben bemutatott méréseket és számításokat Dr. Nagy Lajos és BME, Szélessávú és Hírközlés és Villamosságtan Tanszék kollégái végezték el a tanszék antennakalibráló laborjában. A fejezetben bemutatott eredmények részletesen Nagy 2020 jelentésben találhatók meg, illetve publikálásra kerültek Bányai et al. 2018 munkában.

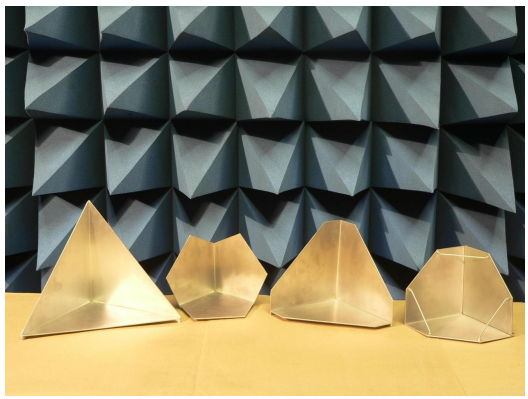
1.10.1 A mesterséges reflektorok alapvető mechanikai és elektromágneses követelményei

Amennyiben a vizsgált területen számottevő elmozdulásokra lehet számítani mind a három komponens esetén (kelet-nyugat, észak-dél, vertikális) a teljes 3D elmozdulások megfigyelésére két reflektorra van szükség, melyek a felszálló- és leszálló műholdáthaladás irányába verik vissza a műholdról beérkező elektromágneses hullámot. Szükség van továbbá az észak-déli komponens meghatározásához, egy erre alkalmas, InSAR-tól független mérési módszerre.

A reflektorokat és a reflektorokat tartalmazó alapzatot, mely lehetővé teszi a precíz felszíni geodéziai mérések elvégzését, egységesen Integrált Geodéziai Alappontnak nevezem, angol neve *Integrated Geodetic Benchmark*, továbbiakban röviden IB.

Mindezen tényezők figyelembevételével egy IB-nek a következő követelményeknek kell megfelelnie:

1. a reflektorok fizikai méretének kicsinek kell lennie, így minimalizálva a reflektor lemezek görbületéből, hőtágulásából és a szél által okozott deformációból származó hatásokat, hogy a reflektivitási értéke a környezeténél sokkal nagyobb legyen (≈ 30 dB) C-sávban,
2. a reflektorok visszaverési karakterisztikája megfelelően érzéketlen kell legyen a pontos irányzásra, azonban szükséges, hogy a reflektorok megfelelő forgatási tartományban állíthatóak le-



1.10.1. ábra. Az analóg kísérletnél használt reflektorok modelljei, balról jobbra: háromszög-, hatszög-, ötszög (20%-os relatív csonkolás)-, ötszög (33%-os relatív csonkolás, megerősítő kapoccsal) háromoldalú reflektor (Bányai et al. 2019a)

gyenek,

3. a felszálló és leszálló irányba forgatott reflektorok a lehető legközelebb kell legyenek egymáshoz, anélkül, hogy egymás fázisválaszában számottevő interferenciát okozzanak,
4. a vasbeton alapzat felszínén a reflektorpároknak és a GNSS adapternek is el kell férnie,
5. a reflektoroknak ellenállónak kell lennie a széllökésekkel szemben,
6. az IB-nek tartalmaznia kell precíz szintezési mérések elvégzésére felhasználható adatpert, melynek segítségével GNSS, geodéziai mérőállomás (horizontális szög, magassági szög és távolság mérésére alkalmas), szintezés és gravitációs mérések végezhetőek el
7. a vasbeton alapzat dőlését vagy billenését precíz mérésekkel kell monitorozni, a dőlésmérések felhasználásával a mért felszíni elmozdulásokat korrigálni kell.

A felsorolt paramétereknek megfelelő IB konstrukció, a terepen telepített betonalapzatból, a betonalapzatra telepített két reflektorból, és precíz geodéziai mérések elvégzésére alkalmas adapterből áll.

Az irodalomban és a gyakorlatban többfajta reflektor geometria ismert (zárójelben az angol irodalomban alkalmazott neve). Leggyakrabban kétoldalú (*dihedral*) vagy háromoldalú (*trihedral*) reflektor geometriákat alkalmaznak, a háromoldalú reflektorok esetén a következő geometriák ismertek: háromszög- (*triangle*), négyzet- (*square*), negyedkör- (*circular*), ötszög- (*pentagonal*), és hatszög- (*hexagonal*) háromoldalú reflektor (lásd. 1.10.1. ábra.)

A háromszög reflektorgeometria a négyzetlapú reflektor csonkolásával érhető el, mégpedig úgy, hogy az négyzetlapok átlója mentén csonkoljuk a reflektort.

Az ötszögű reflektorgeometria kialakítása szintén a négyzetlapú reflektor csonkolásával történik. A csonkolás mértéke megadható abszolút módon (L_r, mennyivel csökkentettük a reflektor élhosszát) vagy relatív számmal (L_r/L, mennyivel csökkentettük a reflektor élhosszát a teljes élhosszhoz képest).

A hatszög reflektor geometria a háromszög reflektor csonkolásával érhető el, úgy, hogy csak azon részeit tartjuk meg a reflektornak, amik részt vesznek az elektromágneses hullám visszaverésében.

1.10.2 Reflektor visszaverési karakterisztikák

Annak érdekében, hogy a különböző reflektorgeometriák visszaverési karakterisztikáit számszerűen össze lehessen hasonlítani, célszerű definiálni néhány alapmennyiséget.

Az első ilyen mennyiség a radarkeresztmetszet (angol irodalomban *Radar Cross Section*, RCS), mely annak a helyettesítő gömb keresztmetszetének területe, mely ugyanolyan vezetőképességgel rendelkezik, mint a radarral vizsgált céltárgy, és a céltárgyat helyettesítve ugyanolyan erősségű visszaverődést eredményezne. Az RCS azt jellemzi, egy tárgy mennyire detektálható elektromágneses hullámok alkalmazásával. Egy adott tárgy RCS értéke függ az elektromágneses hullám frekvenciájától, beesési szögétől, a visszaverődés szögétől, a tárgy anyagi minőségétől, és a tárgy radar hullámhosszá-

hoz viszonyított méretétől.

A RCS megadható dBm^2 egységben, mely a következőképpen számítható ki:

$$\sigma_{\text{dB}}\ [\text{dBm}^2] = 20 \log_{10} \left(\frac{\sigma_{\text{m}}\ [\text{m}^2]}{1m^2} \right) \tag{1.10.1}$$

ahol

- σ_{dB} a dBm^2-ben mért RCS,
- σ_{m} a m^2-ben mért RCS.

Zajos környezetben elhelyezett visszaverő céltárgy esetén hasznos mennyiség a jel-zaj (környezeti zaj) arány (angol irodalomban *Signal to Clutter Ratio*, továbbiakban SCR) ami a céltárgyról visszaverődött elektromágneses energiát viszonyítja a „háttérben" elhelyezkedő tárgyakról visszaverődött elektromágneses energiához. InSAR vizsgálatok esetén a céltárgy egy „stabil" visszaverési karakterisztikával rendelkező objektum (villanyoszlop, elhelyezett sarokreflektor) a háttér pedig lehet a talaj, az (alj)növényzet, földműveléshez kapcsolódóan a vetési barázdák.

A SCR egyik számítási módja Freeman 1992 alapján:

$$\text{SCR} = \frac{\sigma_t}{\langle \sigma_c \rangle} \tag{1.10.2}$$

ahol

- SCR a Signal to Clutter Ratio,
- σ_t a céltárgy RCS,
- $\langle \sigma_c \rangle$ a háttértárgy(ak) RCS értékeinek átlaga (háttér clutter),

A SCR értéke InSAR alkalmazások esetén függ a talajtípustól, talajnedvességtől, vegetáció állapotától, biomasszától, radar hullámhossztól, beesési szögtől, a polarizációtól, és a SAR kép felszíni felbontóképességétől. Sima, művelt, kevés vegetációval borított földfelszín esetén nagyságrendje -10 és -12 dB közötti érték (Garthwaite et al. 2015).

InSAR mozgásvizsgálat esetén a LOS elmozdulás meghatározás hibája becsülhető, amennyiben ismert a céltárgy SCR értéke, Savio et al. 2006 alapján:

$$\Delta_{\text{LOS}} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{1}{2\ \text{SCR}}} \tag{1.10.3}$$

ahol

- Δ_{LOS} a LOS elmozdulás meghatározásának hibája,
- λ a radarhullámhossz

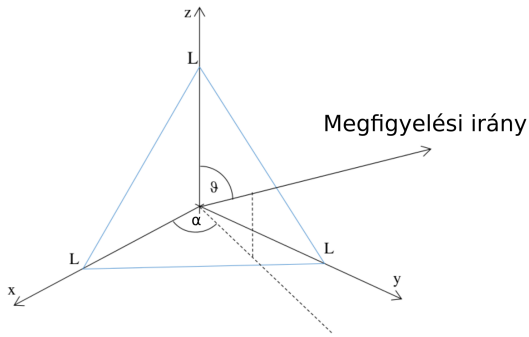
Felhasználva a $\Delta_{\text{LOS}} = 0.1$ mm célértéket és a Sentinel-1 műhold hullámhosszát ($\lambda = 5.5466$ cm) a minimum SCR értékre 38 dB számítható. Megengedőbb LOS elmozdulási hibahatár esetén (0.3 mm) a minimum SCR 20 dB értékre csökken. Az SCR-re kapott értékek elsősorban elméleti meggondolások alapján számíthatók, azaz nem vesznek figyelembe számos hibatényezőt, ezért az irodalomban 30 dB értéket szokták meghatározni mint minimum SCR-t (lásd Freeman 1992; Curlander és McDonough 1991). Ahogyan Ferretti 2014 bemutatta egy 1.0 m-es élhosszúsággal rendelkező háromszögű sarokreflektor, már képes biztosítani a minimum 30 dB SCR értéket.

Fontos még figyelembe venni a reflektor felszíni irregularitásaiból (a reflektorlapok deformációja) származó reflektivitás veszteséget. A mennyiség becslésére egy lehetséges módszer Zink és Kietzmann 1995 szerint:

$$R_{\text{reduction}} = -1028.72 \left(\frac{d}{\lambda} \right)^2 \tag{1.10.4}$$

ahol

- $R_{\text{reduction}}$ a reflektivitás csökkenés,
- d a felszíni irregularitások szórása,



1.10.2. ábra. A reflektor visszaverési karakterisztikák vizsgálatánál alkalmazott szögek. Beesési- (ϑ) és azimut (α) szögek a reflektorhoz illesztett koordinátarendszerben, háromszög reflektor esetén (módosítva Bányai et al. 2018 alapján)

Reflektor típusa	**RCS egyenlet**	**Számított érték [dBm^2]**
Háromszög	$\frac{3\pi L^4}{4\lambda^2}$	31.34
Négyszög	$12\pi\frac{L^4}{\lambda^2}$	40.88
Negyedkör	$\frac{15.6\pi L^4}{3\lambda}$	37.25

1.10.1. táblázat. RCS értékek elméleti meggondolások alapján számított értékei háromszög, téglalap és negyedkör reflektorokra. Az egyenletek a maximális terület és RCS értékekre vonatkoznak kettős visszaverődés esetén értendőek. ($L = 1\,\text{m}$, $\lambda = 55.504\,\text{mm}$)

- λ az elektromágneses hullámhossz.

Feltételezve, hogy $d = 1\,\text{mm}$ és C-sávú jel hullámhosszát használva $\lambda = 5.66\,\text{cm}$, $R_{\text{reduction}} = 0.3\,\text{dB}$ számítható. Ugyan ez a mennyiség nem függ a reflektor méretétől, nagyobb reflektor esetén a széllökések és egyéb környezeti hatások nagyobb erőhatást fejtenek ki a reflektor felületére, jobban deformálva azt, megnövelve a veszteséget. Sarabandi és Chiu 1996 szerint deformációkból származó reflektancia veszteség általában nem haladja meg a $1.3\,\text{dB}$ maximumot.

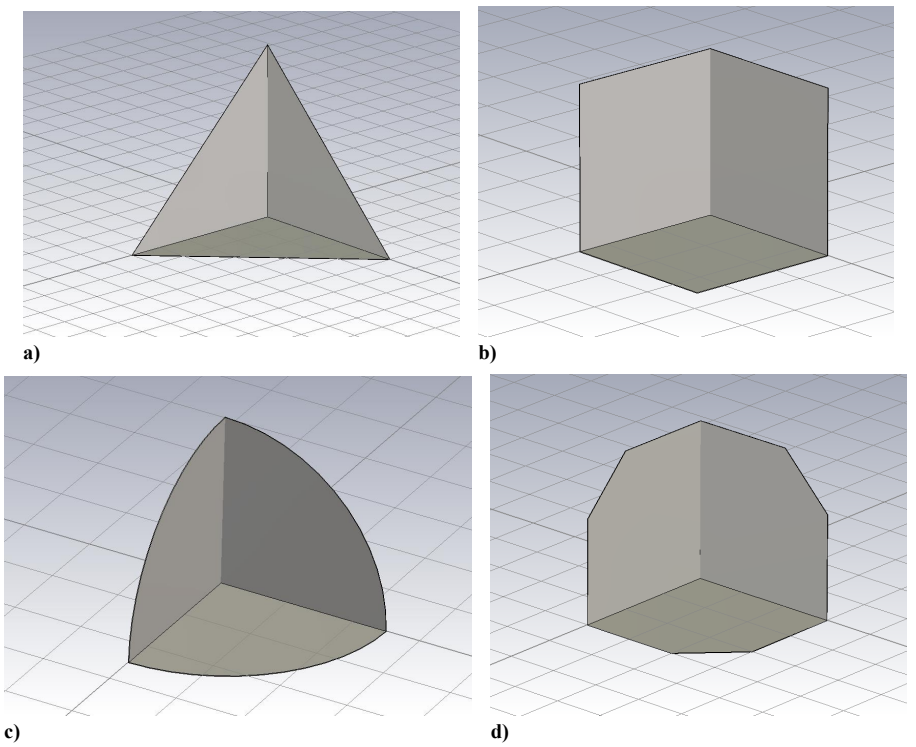
A RCS és SCR mennyiségek csak bizonyos egyszerű geometriák esetén (pl. gömb) irányfüggetlenek, a legtöbb esetben függnek az elektromágneses hullám beérkezési és visszaverődési irányától. A visszaverődés irányát az azimut (angol irodalomban *azimuth angle*, α) és beesési (angol irodalomban *zenith* vagy *incidence angle*, ϑ) szögekkel jellemezhetjük (1.10.2 ábra). A geodéziában a beesési szöget zenit szögnek szokták nevezni.
Néhány jól meghatározott reflektorgeometria RCS karakterisztikája elméletileg jól közelíthető geometriai megfontolások felhasználásával (lásd A.1. fejezet).

1.10.3 Reflektor karakterisztikák vizsgálata

Az itt bemutatott eredmények elméleti hátterét az A. fejezet tartalmazza. Itt csak kizárólag az analitikus (A.1. fejezet), numerikus és analóg (A.3. fejezet) vizsgálatok eredményeit mutatom be.

Az A.1. fejezetben leírt módszerrel ki lehet számítani különböző reflektortípusokra az elméletileg elérhető maximális RCS értéket, melyeket az 1.10.1. táblázat tartalmaz.

A számított maximális RCS értékek alapján úgy tűnhet, hogy a háromszög reflektor teljesít a legrosszabbul és a négyzet és negyedkör reflektorok rendelkeznek a nagyobb RCS értékekkel. Fontos megjegyezni, hogy az RCS értékek változnak az azimut- és beesési szögek függvényében, és a négyzet és negyedkör reflektorok esetén az RCS nem marad a $30\,\text{dBm}^2$ felett széles szögtartományon.



1.10.3. ábra. A numerikus szimulációval vizsgált reflektorok digitális modelljei: a) háromszög, b) négyszög, c) negyedkör d) ötszög reflektor (Bányai et al. 2019b; Nagy 2020)

Az RCS értékek irányfüggését numerikusan is lehet vizsgálni. A 1.10.3 ábrán a numerikus módszerrel megvizsgált reflektorok digitális modelljei láthatóak, a szimuláció kivitelezése a CST Microwave Studio® elektromágneses szimulációk elvégzésére fejlesztett szoftverrel történt.

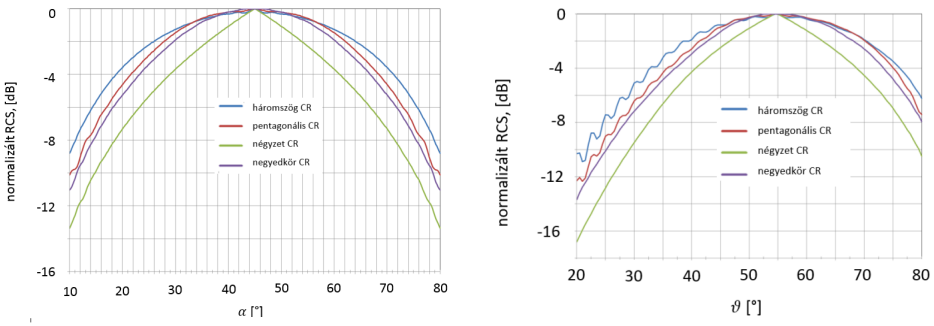
Az 1.10.4. ábra tartalmazza a RCS numerikus szimulációjának eredményeit. A háromszög sarokreflektor rendelkezik az alkalmazás szempontjából legideálisabb RCS karakterisztikával, mivel a maximum RCS értékkel rendelkező iránytól távolodva, a többi sarokreflektor geometriához képest, legkevésbé csökkennek az RCS értékek. A háromszög reflektor RCS görbéjétől az ötszög reflektor RCS görbéje tér el a legkevésbé, ezt követi a negyedkör reflektor. A legkevésbé ideális RCS görbével a négyzet alapú reflektor rendelkezik.

Vegyük észre, hogy az ötszög-, és negyedkör sarokreflektorok RCS görbéi csak minimálisan térnek el a háromszög reflektor görbéjétől a maximális RCS érték $\pm 10^\circ$ környezetében, vagyis ebben tartományban lényegében nincs különbség a háromfajta reflektor között a RCS karakterisztikát tekintve.

A maximális RCS érték körüli viselkedés vizsgálható azon szögtartomány értékének meghatározásával, melyen belül a reflektor normalizált RCS-e meghaladja $-3\,\mathrm{dB}$ értéket. Ezt a szögtartományt nevezik félteljesítményű irányszélességi szögnek, amin belül a visszavert jel teljesítménye jó közelítéssel konstans, jele azimut irányban $\alpha_{-3\mathrm{dB}}$, beesési szög tartományban $\vartheta_{-3\mathrm{dB}}$.

A numerikus szimuláció alapján számított $\alpha_{-3\mathrm{dB}}$ és $\vartheta_{-3\mathrm{dB}}$ értékeket az 1.10.2 táblázat foglalja össze.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy ötszög reflektor RCS karakterisztikája nem tér el nagyságrendileg a háromszög reflektor RCS karakterisztikájától. A nyílásszögeinek értékei ugyan nem érik el a háromszög reflektor nyílásszögek értékeit, azonban megfelelően nagyok ahhoz, hogy a terepi telepítés során a reflektor megfelelően „érzéketlen” legyen az irányzásra. Kisebb mérete miatt kisebb betonalapzatot igényel, továbbá kevésbé érzékeny a széllökésekre és egyéb környezeti hatásokra.



1.10.4. ábra. A numerikus szimuláció eredményei (Bányai et al. 2018): a) reflektor normált RCS értékek az azimut szög, függvényében $\vartheta = 54.74^\circ$ beesési szög esetén, b) reflektor normált RCS értékek a beesési szög függvényében, $\alpha = 45^\circ$ azimut szög esetén. Az ábrán a normált RCS értékek láthatók dB-ben, azaz a szimuláció során számított RCS értékek elosztva az adott reflektorhoz tartozó maximális RCS értékkel és dB-re átszámítva

Reflektor típusa	$\alpha_{-3\text{dB}}$ [°]	$\vartheta_{-3\text{dB}}$ [°]
Háromszög	46.3	38.2
Ötszög	41.1	34.5
Negyedkör	37.6	31.3
Négyszög	25.3	22.5

1.10.2. táblázat. A reflektortípusok numerikus szimulációval számított RCS görbéi alapján becsült nyílásszögek. Az ötszög esetén a csonkolás nagysága $L_r = 0.25$ m volt

Az ötszög reflektor RCS görbéit a csonkolás mértékének függvényében az 1.10.5 ábra tartalmazza. A görbék alapján a $L_r/L < 0.4$ csonkolási tartományban az RCS értékek még nem romlanak olyan mértékben, hogy a reflektor terepi elhelyezésénél szükség legyen pontos irányzásra.

Ezek alapján az öt- vagy hatszög reflektorgeometriák ideális jelöltek terepi alkalmazásra. A végleges reflektorgeometria kiválasztása előtt analóg kísérleti mérésekkel is meghatározásra kerültek reflektor RCS karakterisztikák.

Az A.3. fejezetben leírt mérési elrendezésben többfajta módon kerültek meghatározásra RCS karakterisztikák. Az első méréssorozatban négy reflektor modelljének (a reflektormodellekről részletesen az A.2. fejezetben lehet olvasni) RCS karakterisztikáját határozták meg (Bányai et al. 2019b; Nagy 2020; Bányai et al. 2018). A méréssorozatban vizsgált reflektorgeometriák: háromszög- (Corner-1), 0.2 m csonkolású ötszög- (Corner-2), 0.333 m csonkolású és pántokkal megerősített ötszög (Corner-3), és a 0.5 m csonkolású hatszög reflektor (Corner-4). A vizsgált reflektormodellek az 1.10.1 ábrán láthatóak. A méréssorozat eredményeit az 1.10.6. ábra tartalmazza.

A négy reflektorgeometria RCS karakterisztikájának menete az azimut szög függvényében nagyon hasonló. Mindegyik reflektorgeometria esetén a maximum érték $\alpha = 0^\circ$ közelében található, az RCS profilok közel szimmetrikusak. Az RCS maximumtól távolodva pozitív és negatív irányba az RCS monoton csökken, majd $\alpha = \pm 37.5^\circ$ körül az RCS értékek újra növekednek és elérnek egy lokális maximumot. Tovább távolodva a lokális maximumtól az RCS értékek gyorsan csökkennek. $\alpha > 45^\circ$ szögek felett lényegében már „háttér” (zaj) dominálja az RCS profilt.

A különböző reflektorok karakterisztikájában több nagyságrendű eltérés nem fedezhető fel, a kísérleti RCS karakterisztikák alapján mindegyik reflektorgeometria alkalmas C-sávú radarinterferometriai mozgásvizsgálatra. Nem minden reflektorgeometria rendelkezik, azonban ugyanolyan mechanikai adottságokkal.

A háromszög reflektor (Corner-1) rendelkezik a legkedvezőbb RCS karakterisztikával, viszont méretét tekintve a legnagyobb az összes többi reflektor közül. A nagy méret a terepre szállítás és

telepítés szempontjából is előnytelen, de a reflektor szerkezete is sokkal érzékenyebb lesz a környezeti hatásokra. A legkisebb mérettel a hatszög reflektor (Corner-4) rendelkezik, viszont a reflektor RCS karakterisztikája a legkevésbé kedvező. A Corner-2 és Corner-3 reflektorok a háromszög- és hatszög reflektorok „között" helyezkednek el RCS karakterisztika és méret szempontjából.
A reflektorgeometriák vizsgálata után az IB modellek vizsgálata következett. A kísérletsorozat elvégzésével meg lehet vizsgálni, hogy a reflektorok párban milyen hatással vannak egymás RCS karakterisztikájára, illetve, hogy ez a hatás hogyan változik a különböző elrendezések (szemben álló, háttal álló) esetén.

Összesen három IB geometria RCS karakterisztikáját vizsgálták:

- 33%-osan csonkolt, pántokkal megerősített reflektor (Corner-3), szemben álló elrendezésben
- 20%-osan csonkolt reflektor (Corner-2), szemben álló elrendezésben
- 20%-osan csonkolt reflektor (Corner-2), háttól álló elrendezésben

Az elvégzett mérések alapján a Corner-2 és Corner-3 reflektorgeometriákra esett a választás az IB modellek vizsgálatánál. A két reflektorgeometria megfelelő egyensúlyt biztosít a radarkeresztmetszet és a reflektor méret között. A három IB modell mérési eredményeit, az RCS karakterisztikák az azimut szög függvényében az 1.10.7. és 1.10.8. ábra tartalmazza Descartes és polár koordinátarendszerben ábrázolva.

Mind a háttal álló, mind a szemben álló elrendezésben asszimetrikussá válik a RCS profil. A szemben álló elrendezésben a $\alpha = 0^{\circ}$ értékhez közelebbi lokális maximumnál mért maximális érték nagyobb lesz a 0°-tól távolabbi lokális maximum értékénél, a háttal álló elrendezésben pedig fordítva. Összehasonlítva a két szemben álló elrendezésű alappont karakterisztikáit (1.10.7a. ábra és 1.10.7b. ábra) nem figyelhetünk meg markáns különbségeket. A szemben és háttal álló elrendezések között (1.10.7b. ábra és 1.10.7c. ábra) is csak a fentebb említett aszimmetria figyelhető meg, mint számottevő eltérés, ami nem befolyásolja a reflektorok maximális RCS értékét és irányzásra való érzékenységét.

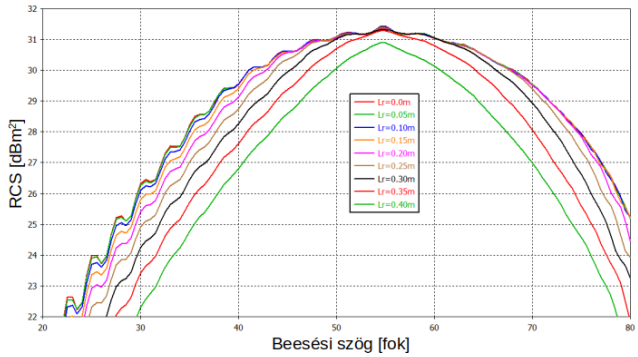
A mérési eredmények megerősítik a numerikus modellezés eredményeit miszerint az ötszög reflektor RCS karakterisztikája nem tér el nagyban az „ideális" háromszög reflektor karakterisztikájától. Megállapítható továbbá, hogy mindhárom IB modell teljesíti a fejezet elején bemutatott reflektor RCS-re vonatkozó feltételeket, azaz megfelelően nagy RCS értéket biztosít egy megfelelően tág szögtartományon a maximum RCS érték körül.

1.10.4 Az alkalmazott reflektorgeometria

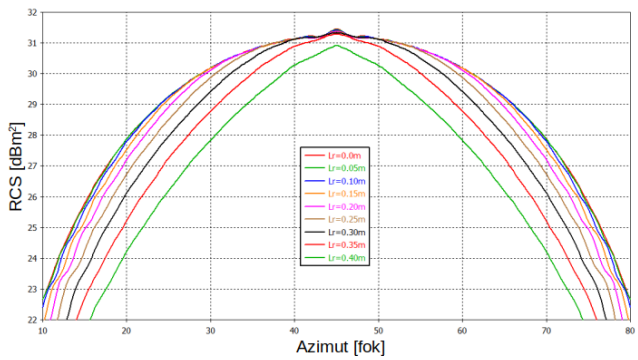
Ebben az alfejezetben bemutattam a legfontosabb szempontokat, amik meghatározzák a felszíni mozgásvizsgálat szempontjából optimális reflektor és integrált geodéziai alappont (IB) elektromágneses és mechanikai tulajdonságait. Ismertettem a különböző reflektor típusok és IB geometriai elrendezések analitikus, numerikus és analóg módszerekkel elvégzett vizsgálatainak eredményeit. Az analóg vizsgálatok megerősítették az analitikus és numerikus számítások eredményeit. Az eredmények alapján kijelenthető, hogy az ötszög reflektor megfelelő egyensúlyt biztosít a mechanikai stabilitás és az elektromágneses reflexiós tulajdonságok szempontjából. Az ötszög reflektornak mind a 20%-os és 33%-os relatív csonkolású, pántokkal megerősített változatának RCS értékei, az „ideális" háromszög reflektorhoz képest, nem csökkennek olyan mértékben, hogy megakadályozzák a felszíni elmozdulások pontos, radarinterferometriai alapú meghatározását. Az IB modellekkel végzett analóg kísérleti mérések továbbá azt is megmutatták, hogy a kétfajta reflektor pár elrendezés között (szemben és háttal álló) nincs elektromágneses tulajdonságokat tekintve, nagyságrendi különbség, tehát mindkét elrendezés alkalmas a kitűzött radarinterferometriai vizsgálatok elvégzéséhez.

1.11 Összefogalalás és célkitűzések

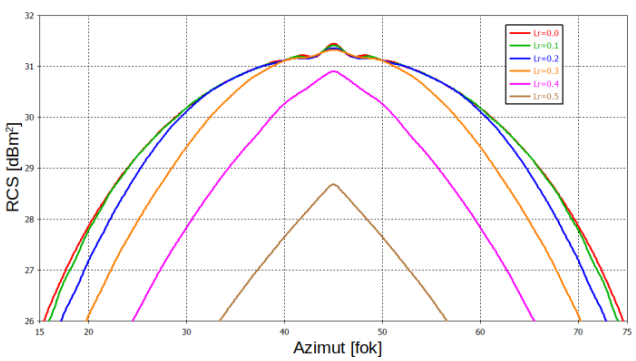
Ebben a fejezetben bemutattam a szintetikus apertúrájú radar távérzékelési technológiát és a SAR felvételekre alapuló interferometrikus (InSAR) vizsgálatok elméleti hátterét. InSAR vizsgálatokkal kiváló felszíni felbontással és akár szubmilliméteres pontossággal lehet a Föld felszínén végbemenő



a)

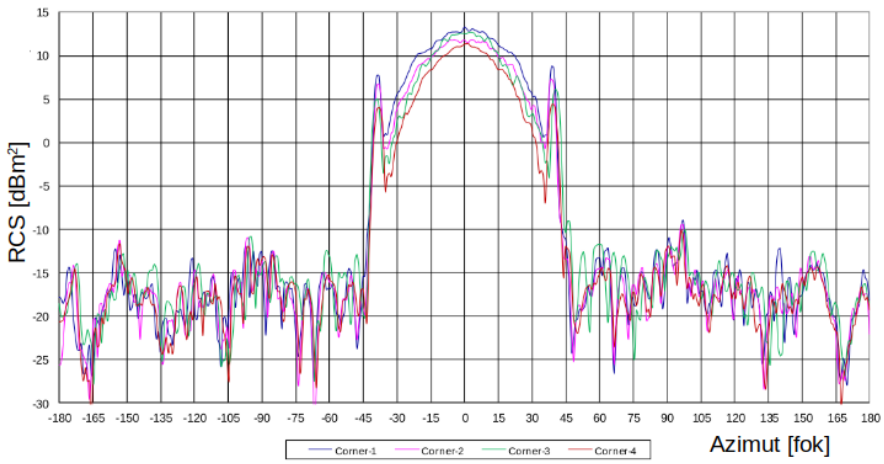


b)

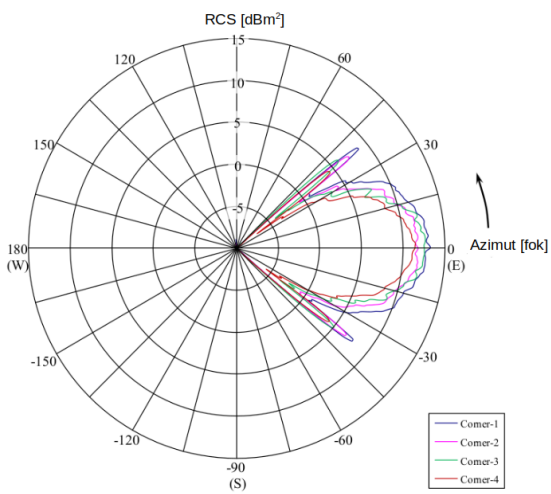


c)

1.10.5. ábra. Ötszögű reflektor RCS értékei az azimut és beesési szögek és a csonkolás mértékének függvényében (Bányai et al. 2019b; Nagy 2020). a) RCS értékek a beesési szög függvényében ($\alpha = 45°$) $L_r = 0 \ldots 0.4$ m csonkolási tartományban. b) RCS értékek az azimut szög függvényében ($\vartheta = 54.74°$) $L_r = 0 \ldots 0.4$ m csonkolási tartományban. c) RCS értékek az azimut szög függvényében ($\vartheta = 54.74°$) $L_r/L = 0 \ldots 0.5$ relatív csonkolási értékek tartományban

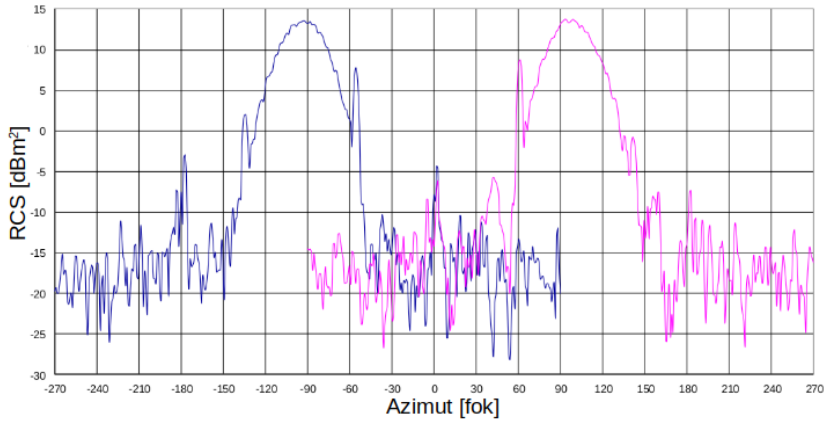


a)

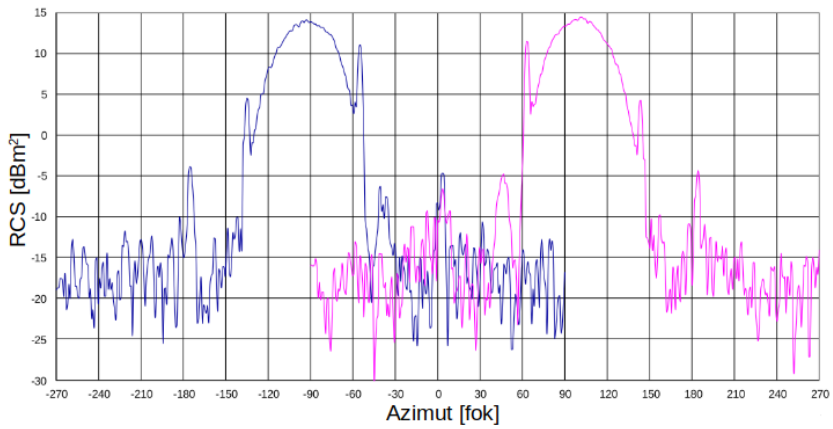


b)

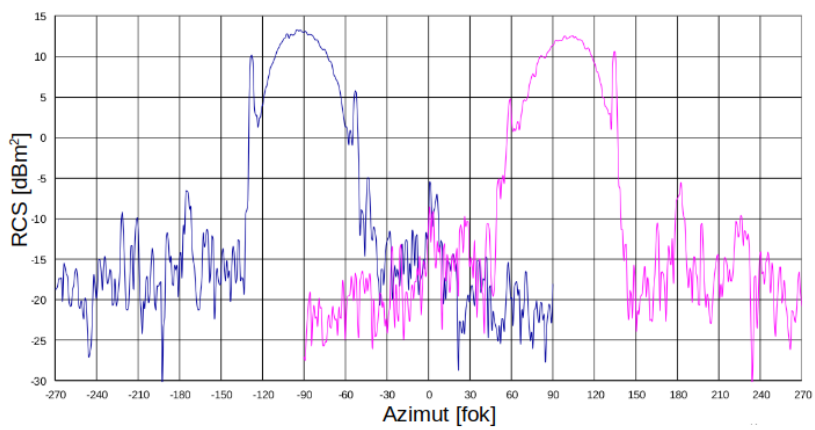
1.10.6. ábra. A négy sarokreflektor monokromatikus RCS karakterisztikája az azimut szög függvényében, konstans beesési szög mellett Descartes (a) és polár (b) koordinátarendszerben ábrázolva ($\vartheta = 35°$, $f = 27\,\text{GHz}$, Bányai et al. 2019b; Nagy 2020)



a)

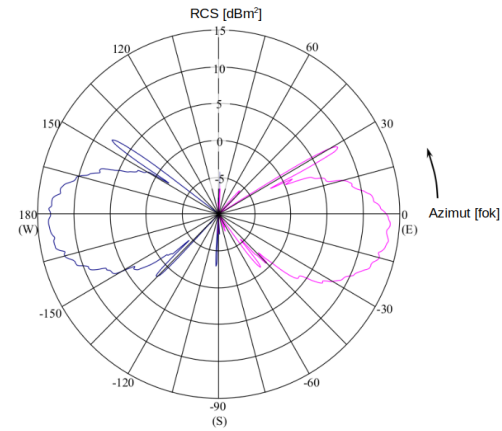


b)

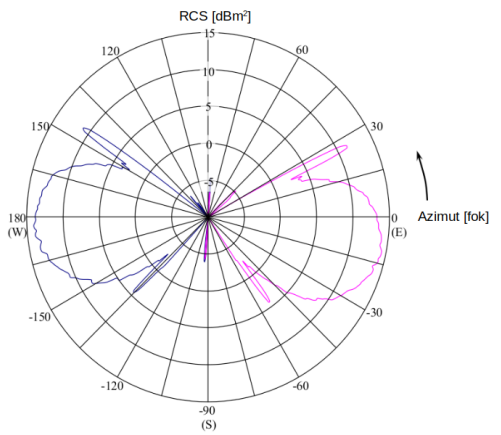


c)

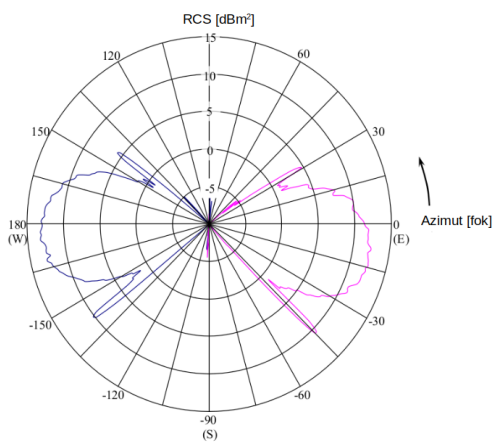
1.10.7. ábra. Az IB modellek RCS karakterisztikája az azimut szög függvényében, konstans beesési szög mellett Descartes koordinátarendszerben ábrázolva ($\vartheta = 35°$, $f = 27$ GHz, Bányai et al. 2019b; Nagy 2020). a) 33%-osan csonkolt, pántokkal megerősített reflektor (Corner-3), szemben álló elrendezésben b) 20%-osan csonkolt reflektor (Corner-2), szemben álló elrendezésben c) 20%-osan csonkolt reflektor (Corner-2), háttól álló elrendezésben . Kék színű vonal: felszálló irányból készített profil, bíbor színű vonal: leszálló irányból készített profil



a)



b)



c)

1.10.8. ábra. Az IB modellek RCS karakterisztikája az azimut szög függvényében, konstans beesési szög mellett polár koordinátarendszerben ábrázolva ($\vartheta = 35°$, $f = 27\,\mathrm{GHz}$, Bányai et al. 2019b; Nagy 2020). a) 33%-osan csonkolt, pántokkal megerősített reflektor (Corner-3), szemben álló elrendezésben b) 20%-osan csonkolt reflektor (Corner-2), szemben álló elrendezésben c) 20%-osan csonkolt reflektor (Corner-2), háttól álló elrendezésben . Kék színű vonal: felszálló irányból készített profil, bíbor színű vonal: leszálló irányból készített profil

elmozdulásokat, deformációkat megfigyelni. Itt fontos megjegyezni, hogy a szubmilliméteres pontosság vagy felszínen elhelyezett mesterséges szórópontok telepítésével, vagy éveket magában foglaló SAR felvétel sorozat interferometrikus feldolgozásával érhető el.

A módszernek természetesen megvannak a korlátai. Olyan területeken, ahol nem marad meg az interferometrikus fázis koherenciája, egyáltalán nem, vagy csak nagy bizonytalansággal lehet meghatározni a felszíni elmozdulásokat. A felszíni elmozdulások pedig mind térben, mind időben is relatív módon értelmezhetőek. Az InSAR technikával továbbá csak a műholdirányú elmozdulások határozhatók meg. Felszálló és leszálló irányban készített képek feldolgozásával meg lehet becsülni a lokális topocentrikus koordinátarendszerben értelmezett kelet-nyugat és vertikális komponensét az elmozdulásoknak, az észak-déli komponensre azonban érzéketlen a módszer.

Dolgozatomban egy olyan újfajta, felszíni elmozdulások megfigyelésére fejlesztett eljárást kívánok bemutatni, mely ötvöz két űrgeodéziai módszert, a GNSS helymeghatározást és a műholdas radarinterferometrián alapuló felszíni elmozdulás számítást, így kiküszöbölve a fent említett két korlátját az InSAR technikának. Az eljárás az **I**ntegration of **S**entinel-1 **I**nterferometry and **G**NSS **N**etwork (továbbiakban ISIGN) nevet viseli. A módszer és az alkalmazáshoz szükséges terepi, ún. integrált geodéziai alappontok, kifejlesztése egy ESA-PECS (*Integrated Sentinel-PSI and GNSS technical facilities and procedures for the determination of 3D surface deformations caused by environmental processes*; 4000114846/15/NL/NDe) és egy NKFIH NKP (*Magyarország szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképének megalkotása és elemzése*; 2018-1.2.1-NKP-2018-00007) pályázat keretén belül valósult meg. Az ESA-PECS pályázat és doktori tanulmányaim célkitűzése volt a módszer kifejlesztése és validálása, a módszerrel meghatározott felszíni elmozdulások publikálása.

A geodéziai alappontok tervezésére már kitértem ebben a fejezetben a dolgozat további részében a módszerfejlesztés során elért eredményeimet mutatom be.

1.12 A dolgozat felépítése

A bevezetőt követően külön fejezetben mutatom be az InSAR módszer egy alkalmazását felszíni elmozdulások meghatározására. A 2. fejezetben az ukrajnai Aknaszlatina (Solotvyno) település területére InSAR módszerrel meghatározott felszíni elmozdulásokat és az elmozdulások alapján elvégzett forrásmodellezést. A feldolgozás során kapott eredmények jól demonstrálják az InSAR technikában rejlő lehetőségeket és korlátait, rámutatva a dolgozat további fejezeteiben bemutatott eljárás előnyeire.

Annak a bizonyításához, hogy a fejezetben bemutatott IB konstrukció valóban felhasználható felszíni elmozdulások meghatározására elengedhetetlen terepi telepítés és a telepített IB-ből alkotott hálózat(ok) elmozdulásainak InSAR alapú meghatározása. Mindezek előtt azonban szükséges megvizsgálni a telepített sarokreflektorok visszaverési karakterisztikáit. A reflektor SCR értékek kiszámítására alkalmazott módszert a számítási eredményeket a 3. fejezet tartalmazza.

A következő fejezetekben az ISIGN módszerhez kapcsolódó fejlesztéseket mutatom be, különös hangsúlyt fektetve a saját eredményeimre. A 4. fejezetben részletezem az eljárást, mellyel azonosítani lehet a SAR felvételekből számított intenzitásképeken a terepi IB-ket, a 5. fejezetben pedig az azonosított IB-hez tartozó interferometrikus fázisértékek kicsomagolására fejlesztett algoritmust mutatom be.

A 6. fejezet a teljes ISIGN feldolgozási lánc leírását részletezi, továbbá az ISIGN módszer alkalmazása során kapott eredmények leírását, az eredmények és a módszertan diszkutálását és korábbi mérési kampányok eredményeivel történő összehasonlítást tartalmazza.

A dolgozatot az elvégzett fejlesztések tézisek szerinti összefoglalása zárja.

2 Felszíni elmozdulások meghatározása és modellezése InSAR módszerrel Aknaszlatina településen

Ebben a fejezetben az ukrajnai Aknaszlatina (Solotvyno) település területére elvégzett InSAR feldolgozás által meghatározott felszíni elmozdulási sebességeket és a sebességek alapján elvégzett model-

lezési eredményeket mutatom be (Szűcs et al. 2021). A bevezetőben részletezem azokat a feldolgozási lépéskeket melyek szükségesek az aknaszlatinai InSAR feldolgozáshoz és a későbbi fejezetekben bemutatott ISIGN feldolgozáshoz.

2.1 Az InSAR feldolgozás lépései

A Sentinel-1 felvételek radarinterferometrikus feldolgozása a Gamma szoftverrel (Werner et al. 2000; Wegmüller et al. 2016b) és a StaMPS módszer (Hooper 2006; Hooper et al. 2012) és a módszerhez fejlesztett Matlab programcsomaggal (The MathWorks Inc. 2022) kivitelezhető.

A Gamma és ISIGN szoftvert a linux operációs rendszer parancssor értelmező környezetében lehet kezelni.

Az ebben a fejezetben bemutatott feldolgozást mind felszálló, mind leszálló irányú felvételsorozatra el kell végezni.

A feldolgozás előkészítéseként le kell tölteni a vizsgált területet lefedő Sentinel-1 IW SLC fájlokat. Az SLC képhez tartozó adatfájl és a meta-adatok egy `zip` fájlba becsomagolva tölthetők le a *Copernicus Homepage* é. n. földmegfigyelő program keretén belül fejlesztett *SciHub Homepage* é. n. oldalról. A letöltött felvételek által lefedett időszaknak tartalmazniuk kell legalább egy kezdő- és egy záró GNSS mérési időpontot. Az ISIGN módszer alkalmazásához nem szükséges a GNSS mérési időpontokat magában foglaló időszakban az összes Sentinel-1 SLC felvételt letölteni. Amennyiben csak minden második felvételt dolgozunk fel, minden 12 napra lehet csak megállapítani a felszíni elmozdulásokat, mely lassú felszíni elmozdulások esetén is elegendő lehet. Például ha $v < 2.77 \text{ cm}/12$ nap, azaz a műholdirányú felszíni elmozdulások nagysága nem haladja meg a hullámhossz felét 12 naponta.

A letöltött `zip` fájlokat a Gamma szoftver által használt fájlformátumba kell importálni a Gamma programcsomag felhasználásával. A fájlok letöltése és az importálás után kezdődhet az interferometrikus feldolgozás.

2.1.1 Mester felvétel kiválasztása

Ki kell választani egy ún. mester felvételt, mely referenciaként fog szolgálni a feldolgozás során, mind a digitális terepmodell, mind a többi SLC számára.

A feldolgozás kezdetén lehetőség van adott burst elemek kiválasztására a mester felvételen belül, amennyiben nem szükséges az egész SLC által lefedett területre elvégezni az interferometrikus mozgásvizsgálatot. Mivel az IB hálózatok kis területen helyezkednek el ($< 1\,\text{km}^2$), tipikusan egy burst elemen belül, elég lenne egy vagy maximum kettő burst elem kiválasztása. A gyakorlatban szükséges több burst elemet kiválasztani, általában minimum 2-3 elemet. A 2.1.3. fejezetben részletezett ún. koregisztrációs lépés ugyanis a felhasználja a burst elemek átlapolódó területeiben található fázisinformációt. Minél több burst elemet dolgozunk fel, annál több átlapolódó területtel képes dolgozni a koregisztrációt megvalósító program.

A mester SLC burst elemeinek kiválasztása után a többi SLC esetén is ki kell választani a megfelelő burst elemeket és importálni őket Gamma szoftver által használt formátumba.

A továbbiakban a kiválasztott burst elemekből álló SLC fájlokat csak egyszerűen SLC fájloknak nevezem.

2.1.2 A mester felvétel geokódolása

Az SLC fájlokban tartalmazott adatok a SAR felvétel referencia rendszerében értelmezhetőek. Ahhoz, hogy az interferometrikus feldolgozás során az SLC fájlokból származtatott produktumokat a WGS-84 vagy más referencia rendszerbe lehessen átszámítani egy ún. *lookup* táblát kell készíteni, mely lehetővé teszi egy adott, SAR felvétel referencia rendszerben értelmezett, adatok újramintavételezését a WGS-84 referencia rendszerbe. Ez az ún. geokódolás (ezt a lépést nevezik az angol irodalomban *geocoding*-nak).

A geokódoláshoz szükség van a mester SLC-ből kinyerhető intenzitás adatokra. Ehhez először egy ún. mozaik SLC-t kell készíteni. A „mozaikolás" során az egyes burst elemekből egy folytonos „mozaik" képet állítunk elő. Az így kapott mozaik SLC-ből pedig ún. *multi look intensity* (továbbiakban MLI) képet kell készíteni, mely az SLC pixelek intenzitását tartalmazza (az intenzitás az amplitúdó négyzete).

A „multi look" elnevezés arra utal, hogy lehetőség van egy olyan művelet elvégzésére, amely során azimut és range irányban lehet pixelértékek átlagát kiszámítani. A range és azimut irányban az átlagolás mértéke lehet eltérő (pl. 10 pixel átlagolása range irányban, 2 pixel átlagolása azimut irányban). Az átlagolással javítani lehet a jel-zaj arányon a térbeli felbontás kárára.

Mivel a telepített reflektorok fázisát kívánjuk felhasználni csak a legritkább esetekben érdemes átlagolást végezni, mivel ezzel a reflektor által dominált felbontási cellában tárolt koherens fázisinformáció minőségét lerontanánk azzal, hogy átlagoljuk a környező inkoherens cellákban tartalmazott fázisinformációval, tehát a feldolgozás során kizárólag az intenzitásképet kell kiszámítani, a pixelek átlagolása nélkül. Más feldolgozási stratégia alkalmazása esetén, pl. ún. SBAS feldolgozás, kifejezetten előnyös az átlagolás elvégzése.

A Gamma képes a mester felvétel metaadatai alapján készíteni egy kivágatot a rendelkezésre egy álló DEM adatbázisból. A kivágatot tovább lehet finomítani a mester felvétel műholdkoordináták alapján mely egy finomabb DEM kivágatot eredményez, és egy kezdeti *lookup* táblát is generál. A kezdeti *lookup* tábla alapján egy szimulált intenzitás kép is készíthető, mely felhasználható a *lookup* tábla pontosítására.

Mivel a Sentinel-1 pályaadatok igen nagy pontossággal ismertek a kezdeti lookup tábla is megfelelő lehet a SAR és WGS-84 referencia közötti transzformációhoz. Érdemes lehet azonban finomítani a *lookup* táblán, amennyiben maximális pontosságot kívánunk elérni.

A *lookup* tábla finomítását a következők lépésekkel lehet elvégezni: Először beolvasva a mester MLI kép és a szimulált intenzitáskép adatfájlok tartalmát melyeket felosztva egymással átfedő tartományokra, a tartományokon belül meg lehet határozni az intenzitásképek keresztkorrelációs értéket különböző eltolás vektorok esetén. A maximális keresztkorrelációs értékhez tartozó eltolásvektort pedig kimenthető egy adatfájlba.

A különböző tartományokon meghatározott eltolási vektorkomponensekre legkisebb négyzetes illesztéssel n-ed fokú polinom illeszthető. A polinomegyüttthatók felhasználásával létre lehet hozni egy finomított *lookup* táblát, a finomított *lookup* tábla felhasználásával pedig újra ki lehet számítani a szimulált intenzitásképet. Ezt követően újra el lehet végezni a keresztkorrelációs számítást az új intenzitásképpel. A munkafolyamatot iterálni lehet míg el nem érünk egy meghatározott iterációs számot, vagy valamilyen küszöb értéket, pl. küszöb átlagos korrelációs értéket.

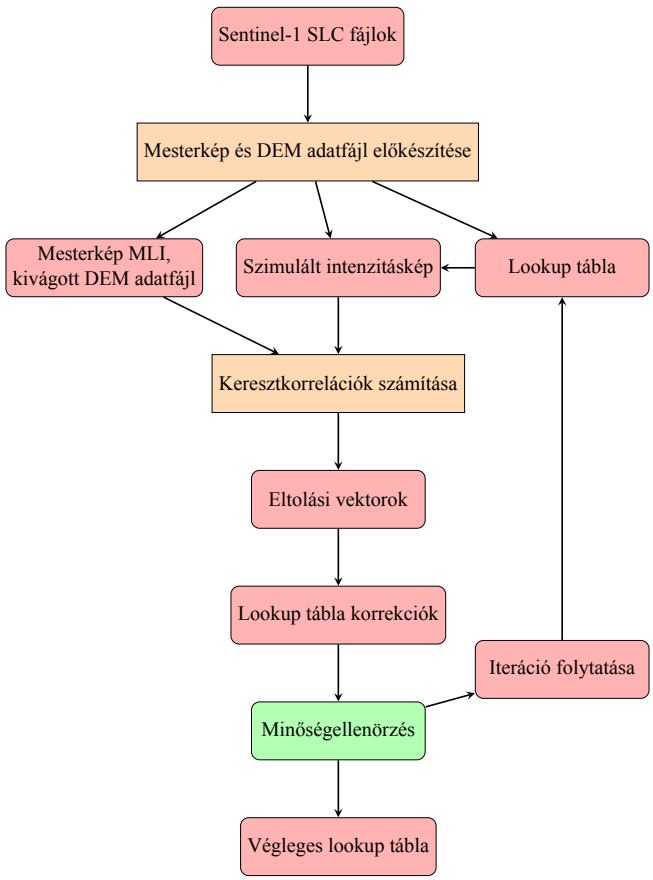
A pontos *lookup* tábla meghatározása után a DEM fájlban tárolt referencia felület feletti magasságokat (a legtöbb esetben ezek WGS-84 referencia ellipszoid feletti magasságok), újra kell mintavételezni a mester képgeometriába.

A geokódolás folyamatát a 2.1.1. ábra foglalja össze.

2.1.3 Differenciális interferogamok készítése

A Föld felszínének ugyanazt szegmensét lefedő SLC felvételek nem tökéletesen fedik egymást. Az interferogramok készítésénél azonban az SLC képben jelenlévő kis eltolódás is komoly hibát eredményezhet az interferogram fázisában. Emiatt szükséges, a geokódolási lépéshez hasonlóan, egy *lookup* tábla kiszámítása a mester és szolga felvételek között, aminek felhasználásával minden SLC felvételt újra lehet mintavételezni a mester képgeometriába. Ez az ún. koregisztrálás (angol irodalomban *co-registration*, lásd Li, Bethel et al. 2008). Az újramintavételezett (koregisztrált) SLC képeket szokás *resampled* SLC képnek, röviden RSLC-nek nevezni. Az RSLC-ből készített MLI képet RMLI képnek szokás nevezni.

A Gamma szoftvercsomag a Sentinel-1 felvételek koregisztrálását két lépésben valósítja meg. Először a 2.1.2 fejezetben bemutatott, SAR felvétel pár intenzitásán alapuló, keresztkorrelációs módszert



2.1.1. ábra. A Sentinel-1 mester SLC felvétel geokódolásának lépései

alkalmazva meghatároz egy „nyers” *lookup* táblát, melyet az ún. *Enhanced Spectral Diversity* (röviden ESD, Fattahi et al. 2016) módszer alkalmazásával tovább pontosít.

A differenciális interferogramok (továbbiakban csak interferogramok), melyek kizárólag a felszíni elmozdulásból származó fázistagot tartalmazzák, elkészítéséhez szükség van az 1.5. fejezetben tárgyaltak szerint a topográfiai fázistag modellezésére és eltávolítására. Ehhez a ki kell számítani a topográfiai fázist, a pályaadatok és a SAR geometriában transzformált felszín feletti magasság (DEM) adatfájl felhasználásával. Az RSLC fájlok és a szimulált topográfiai fázis felhasználásával lehet elkészíteni az interferogramokat.

A interferogramok elkészítése során ki kell választani az összes lehetséges RSLC pár kombináció közül azon párokat melyek felhasználásával elkészítjük az interferogramokat. Az 1.7. fejezetben bemutatott két stratégia közül az ISIGN feldolgozáshoz a PS stratégiát érdemes választani, azaz egy kiválasztott mesterképet párosítva minden más RSLC képhez kell létrehozni interferogramokat. Mivel a reflektorok koherens és stabil interferometrikus fázist biztosítanak, nincs szükség az idő- és térbeli bázisvonalak minimalizálására.

2.1.4 Az adatok előkészítése az ISIGN feldolgozáshoz

Amennyiben az interferogamokat 6.1. fejezetben bemutatott ISIGN feldolgozáshoz kívánjuk felhasználni, el kell dönteni, hogy a differenciális interferogramok fázisát használjuk fel a továbbiakban vagy egy idősorelemzésen alapuló módszert alkalmazunk. Az idősorelemzés alatt itt egy ún. MTInsar, azaz *multi-temporal InSAR* módszert kell érteni. Az elnevezés különböző időpontokban készült SAR felvételekből származtatott interferogramok együttes feldolgozására utal.

A dolgozatban mind az interferogramok feldolgozásával, mind az MTInsar idősorelemzéssel elvégeztem az ISIGN feldolgozást, az idősorelemzéshez az ún. StaMPS módszert (Hooper et al. 2010) alkalmaztam, bár más módszerek is alkalmasak erre a feladatra (pl. Werner et al. 2003).

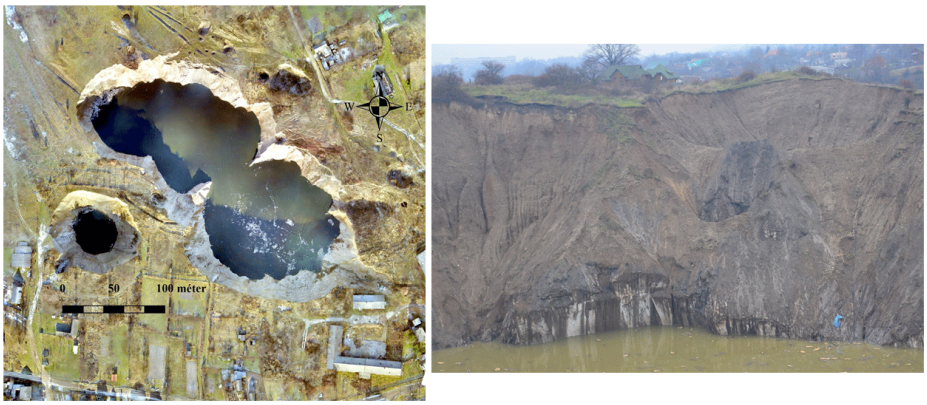
Ezután következhet az IB LOS elmozdulások meghatározása és kombinálása a GNSS elmozdulásokkal (lásd 6.1. fejezet).

2.2 A vizsgált terület - az aknaszlatinai sóbányászat

A Kárpát-Pannon régióban nagy mennyiségű só halmozódott fel mind a Kárpátok vonulatán belül, az Erdélyi-medencében, mind a Kárpátok vonulata mentén. Az Erdélyi-medencében néhány 10 méteres vastagságú sórétegek rakódtak le, melyeket későbbi folyamatok ún. só-diapírokká (sódómókká) gyűrtek. Nagy mennyiségű só vándorolt a medencék széle felé, mely kettő, medence szélével párhuzamos diapír övet hozott létre (Krézsek és Bally 2006). A felszínközeli sórétegeket sok településen bányászták a keleti- és a déli-kárpátok mentén Ukrajna és Románia területén, az egyik ilyen település az Ukrajnában található Aknaszlatina (Solotvyno).

Ugyan mára már számos helyen beszüntették a sóbányászatot, sok felhagyott bánya a mai napig komoly kockázatot jelent a helyi infrastruktúrára és lakott területek biztonságára nézve (Deák et al. 2007; Móga et al. 2015; Móga et al. 2019). Az édesvíz felhagyott bányaüregekbe és a talajba történő beszivárgása során a víz kioldja a bányaüregek környezetében a talaj sótartalmát destabilizálva a bányaüreget, mely a bánya beomlásához vezet. A beomlás veszélye sok település infrastruktúráját fenyegeti azonban a legkomolyabb kockázatot a kioldott sótartalom talajvízbe és a Tisza folyóba történő beszivárgása jelenti. A Tisza a régió egyik fő folyója, nagy mennyiségű sótartalom beszivárgása esetén az okozott környezeti károk kiterjedhetnek több országra is (Ukrajna, Szlovákia, Magyarország, Románia, Szerbia), mely környezeti katasztrófát idézhet elő. A kockázatot az Európai Bizottság is felismerte és jelentős forrásokat különített el, hogy támogassa az érintett területek katasztrófa megelőzési tevékenységét.

Aknaszlatina területén összesen 10 bánya működött, ezek közül a 8-as és a 9-es bánya működött a leghosszabb ideig. Aknaszlatinán több bányaüreg beomlása vezetett dolinák és víznyelők kialakulásához, melyek átmérője elérte a 150–230 m-t is (lásd 2.2.1. ábra).



2.2.1. ábra. A 2012-ben Aknaszlatina településen kialakult víznyelő (Szűcs et al. 2021)

A továbbra is fennálló veszély ellenére Aknaszlatinán nem alakítottak ki permanens megfigyelő hálózatot, mely képes lenne a felszíni elmozdulások monitorozására. A bevezető fejezetben bemutatott InSAR módszer azonban kíváló felszíni és időbeli felbontással képes információt szolgáltatni felszíni megfigyelési infrastruktúra nélkül is, így alkalmas annak a megvizsgálására, hogy a közelmúltban történtek-e felszín alatti bányaüregekhez köthető felszíni elmozdulások.

2.3 Az InSAR feldolgozás

Az InSAR feldolgozáshoz 4 évet felölelő Sentinel-1 felszálló- és leszálló-irányú SAR képeket dolgoztam fel a 2.1. alfejezetben bemutatott módszerrel. Mivel a felszíni visszaverőképesség nagymértékben megváltozik a hótakaró hatására, számottevő mértékben lerontva az interferogramok koherenciáját, a téli időszakban készült SAR felvételeket kihagytam a feldolgozásból.

A magas süllyedési sebességek megfelelő leképzéséhez és a koherencia maximalizálásához az SBAS eljárást alkalmaztam az interferogramok elkészítéséhez (Berardino et al. 2002). Az interferogram párokat úgy választottam ki, hogy az interferogram hálózat tartalmazzon redundanciát, így lehetővé téve a kicsomagolási hibák azonosítását. Az interferogramok felhasználásával PS és DS pontokat is azonosítottam, a DS pontok azonosításához 5×1-szeresen (5 minta átlagolása range irányban) *multilook*-olt interfergramokat használtam, mellyel kb. $15\,\mathrm{m}\times15\,\mathrm{m}$-es felszíni felbontással rendelkező interferogramokat kaptam.

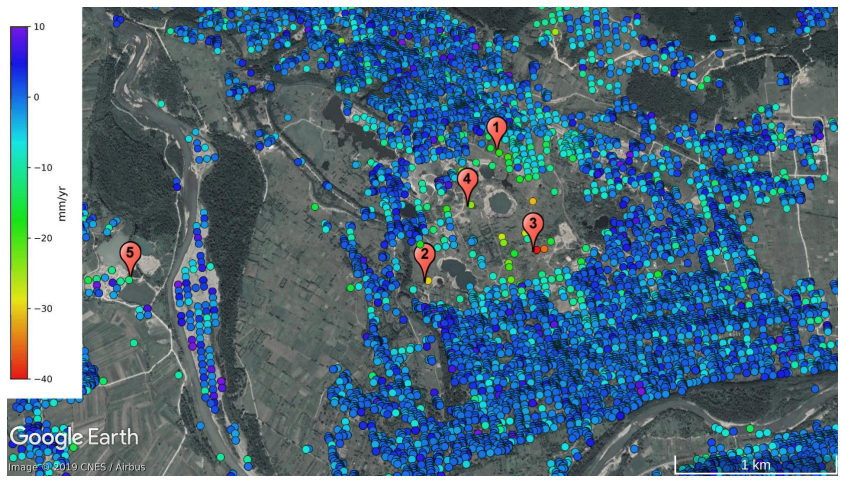
A fáziskicsomagolást iteratív módon hajtottam végre. Az iteráció során elvetettem azokat a PS és DS pixeleket, melyek kicsomagolási reziduál értéke meghaladta az 1 radiánt. A kicsomagolás során feltételeztem, hogy a felszíni elmozdulások időbeli fejlődése egy lineáris modellel írható le.

A kicsomagolt interferogramok tartalmazták az atmoszférikus fázist. Az atmoszférikus fázis korrekciójába vételéhez, kiválasztottam olyan területeket az interferogramokon belül, melyek deformációval nem érintettek. Az általunk becsült atmoszférikus fázis egy magassággal korrelált tagból és a reziduális fázis hosszú hullámhosszú komponenséből tevődött össze, melynek a meghatározásához egy aluláteresztő szűrőt alkalmaztam, mely 5 km-es karakterisztikus hullámhosszal rendelkezett. Ez azt eredményezte, hogy az 5 km-nél nagyobb hullámhosszal rendelkező nem-lineáris felszíni elmozdulás komponens atmoszférikus hatásként volt kezelve. Tekintve viszont, hogy a felszíni elmozdulások egy relatíve kis területen lokalizáltak, feltételezhető, hogy nem volt számottevő hosszú hullámhosszú nem-lineáris komponense a felszíni elmozdulásoknak.

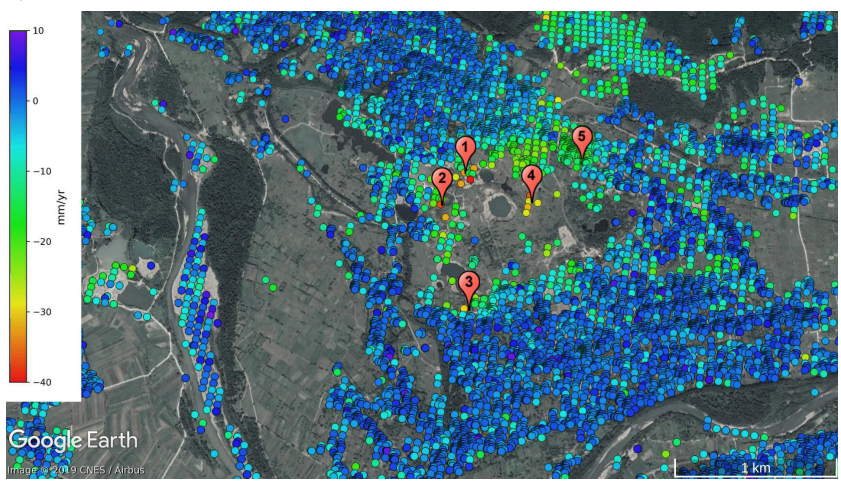
Az atmoszférikus korrekciók után kicsomagolt fázisból legkisebb négyzetes kiegyenlítéssel meghatároztam a felszíni elmozdulásokat (Berardino et al. 2002; Wegmüller et al. 2016a).

A felszálló- és leszálló-irányú felvételekből meghatározott elmozdulások sebességét a 2.3.1. ábra tartalmazza.

A felszálló-irányú elmozdulási sebességek mintázata tisztán mutatja a körkörös mintázatát a de-

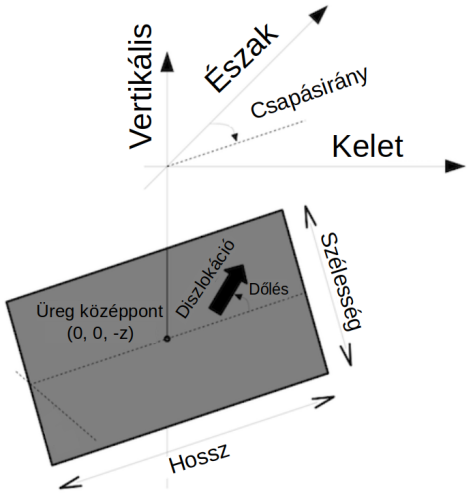


a)



b)

2.3.1. ábra. A felszálló- és leszálló-irányú Sentinel-1 felvételekből InSAR-al meghatározott felszíni elmozdulások sebességei. Az (a) ábra a felszálló-, a (b) ábra a leszálló-irányból készült felvételek alapján meghatározott sebességeket tartalmazza



2.4.1. ábra. Az Okada-modell sematikusan ábrázolva (módisítva *OKADA: Surface deformation due to a finite rectangular source* é. n. alapján). A szürke téglalap jelöli a diszlokációval érintett területet a lokális Descartes-koordináta rendszerben

formálódó területnek a felszíni beszakadás során kialakult víznyelő körül. A leszálló irányú sebességekben is hasonló mintázat fedezhető fel, mely arra utal, hogy a felszíni elmozdulások elsősorban vertikális jellegűek.

A leszálló-irányú sebességek a víznyelőtől északra további felszíni elmozdulásokat mutatnak, melyek alig vannak jelen a felszálló-irányú sebességekben. Ezek az elmozdulások valószínűleg a terep lejtéséből fakadó helyi földcsuszamlásból származnak.

2.4 A felszíni elmozdulások modellezése

Az InSAR feldolgozásból számított felszíni elmozdulások felszín alatti folyamatokhoz kapcsolásához numerikus modellezést hajtottam végre. A felszín alatt található üregek beomlását Okada 1992; Segall 2010 alapján modelleztem. Homogén, izotróp, rugalmas féltérben elhelyezett téglatest alakú diszlokációs modellek alapján vizsgáltam a felhagyott bányaüregek beomlásával keletkező felszíni süllyedési formákat. A diszlokáció mértéke minden irányban megegyezett (izotróp). Az Okada-modell alapján kiszámítható a féltér felszínén végbemenő felszíni elmozdulások és azok sebessége. Az Okada-modell alapján ki lehet számítani a felszín alatti diszlokáció által okozott felszíni 3D sebességeket. A műholdpálya adatok alapján a modell 3D sebességek levetíthetők a felszálló- és leszálló műholdályához tartozó LOS irányba, meghatározva ezzel egy adott Okada-modellhez tartozó felszálló- és leszálló irányú LOS sebességeket. A modell LOS sebességek és az InSAR által meghatározott LOS sebességek felhasználásával becsülhetők a modellparaméterek. A modellezés során feltételeztem, hogy a téglatest dőlése 90°, azaz a téglatest párhuzamos a helyi vízszintessel. Az Okada-modell egy sematikus ábrázolását tartalmazza a 2.4.1. ábra.

Az inverzióhoz a kezdeti modellparamétereket a paramétertérben való kereséssel határoztam meg. A bányák fellelhető adatai (fizikai elhelyezkedés, méret) alapján az összes lehetséges modellparaméter kombinációra meghatároztam a δ célfüggvényt. A modellparamétereket a bányaüregek ismert adatai alapján korlátoztam be. A legjobb illeszkedést biztosító paraméterek képezték a GBIS-en alapuló inverzióhoz a kiindulási adatokat:

$$\delta = \left[\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} \frac{(d_i - d_{i,\mathrm{m}_j})^2}{N} \right]^{1/2}, \tag{2.4.1}$$

ahol,

	Forrás 1		Forrás 2		Forrás 3		Forrás 4	
	Kezdeti	Végleges	Kezdeti	Végleges	Kezdeti	Végleges	Kezdeti	Végleges
Hossz [m]	36	24.1	72.5	63.5	80	78.2	80	72.3
Szélesség [m]	42	64.0	176	187.8	80	81.8	90	82.1
Mélység [m]	180	199.7	222	231.9	280	273.1	295	295.9
Csapásirány [°]	5	12.8	21.5	19.1	22	18.7	21	17.1
X koordináta [m]	-870	-880.3	-1195	-1259.1	-1600	-1630.8	-1700	-1700.5
Y koordináta [m]	1160	1195.8	956	1029.6	230	224.9	810	793.1
Diszlokáció mértéke [m]	-3.2	-2.8	-1.4	-1.2	-3.9	-2.3	-3.8	-3.1

2.4.1. táblázat. A téglatest alakú üregek paraméterbecslése során felhasznált kezdeti és a GBIS módszerrel (Bagnardi és Hooper 2018) meghatározott végleges forrásparaméterek (Szűcs et al. 2021)

- d_i az i-ik pontban meghatározott felszíni elmozdulás,
- d_{i,m_j} a j-ik modellhez tartozó felszíni elmozdulás az i-ik pontban kiszámítva,
- N a pontok száma, ahol ismert a felszíni elmozdulás,
- M a források száma.

A meghatározott modellparamétereket tovább finomítottam az ún. GBIS módszerrel (*Geodetic Bayesian Inversion Software*, Bagnardi és Hooper 2018). A GBIS módszer az InSAR felszálló- és leszálló LOS elmozdulásokat négyesfa felosztás szerint újramintavételezi és az újramintavételezett LOS adatrendszerrel meghatározza a modellparamétereket és azok bizonytalanságát. A nyílt forráskódú Matlab kódot úgy módosítottam, hogy tetszőleges számú és paraméterezésű téglatest alakú üreget képes legyen kezelni, a módosított kóddal pedig meghatároztam a források paramétereit: a téglatest kiterjedését, a téglatest közepének horizontális koordinátáit, a téglatest felszín alatti mélységét, az északi irányhoz képest meghatározott csapásirányt, és az üreg térfogatának változását.

A paraméterbecslés során a források paraméterei egy meghatározott tartományon belül vehettek fel értéket. A tartományokat geológiai megfontolások, múltbéli bányászati feljegyzések alapján határoztam meg. A bányaüregek pontos helyéről, kiterjedéséről, irányzásáról, és mélységről nem volt elérhető információ. Az üregek mélysége vélhetően 50 és 400 m közötti tartományon található, a bányaüregek hozzávetőleges helykoordinátáit a rendelkezésre álló térképek és a sóréteg kiterjedése alapján határoztam meg.

A süllyedő területen fellépő koherencia romlás miatt, nem volt lehetséges a teljes elmozdulási mintázat feltérképezése. Az információ hiánya a süllyedő terület közepe körül különösen megnehezítette a források számának pontos meghatározását. Az elmozdulási adatok alapján négy forrást feltételeztem, melyekre elvégeztem a paraméterbecslést. A paraméterbecslés eredményeit a 2.4.1. táblázat tartalmazza; a forráskoordináták a lokális Descartes-koordinátarendszerben vannak megadva.

Forrás 1 a 9-es bánya keleti széle felett található kb. 200 m mélyen. A 9-es bányát 2008-ban elöntötte a víz és ezért lezárták a hatóságok.

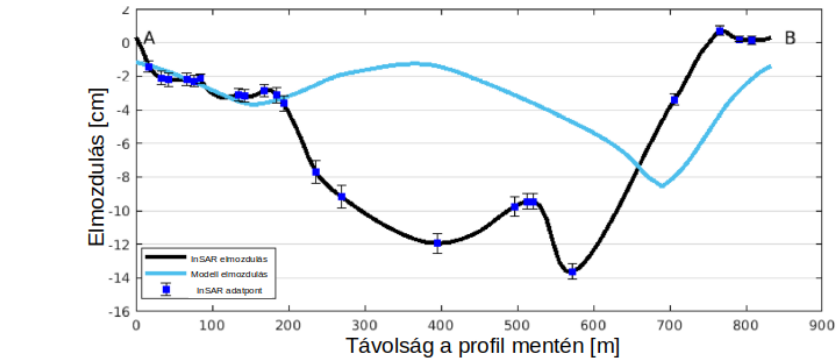
Forrás 2 a *Forrás 1*-től kb. 400 m-re délkeletre található. A hozzávetőlegesen észak-déli irányban megnyúlt alakja a forrásnak egybevág a felszín alatti bányászati tevékenységről rendelkezésre álló információkkal.

Forrás 3 a deformálódó terület nyugati szélén helyezkedik el. Néhány sekély bányaüreg található a közelben, melyeket teljesen elpusztultak, amikor kisméretű dolinák kialakultak a területen.

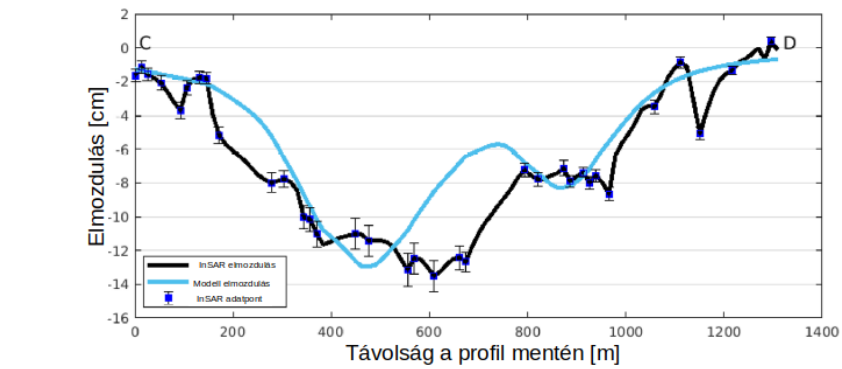
Forrás 4 a 8-as bánya alatt található, mely felett 2010-ben számottevő süllyedés volt tapasztalható, mely két tó kialakulásához vezetett.

A modellezés szerint előrejelzett és az InSAR által meghatározott LOS elmozdulásokat összehasonlítottam felszálló- és leszálló-irányú esetben két profil mentén. A profilokat a 2.4.2. ábra tartalmazza.

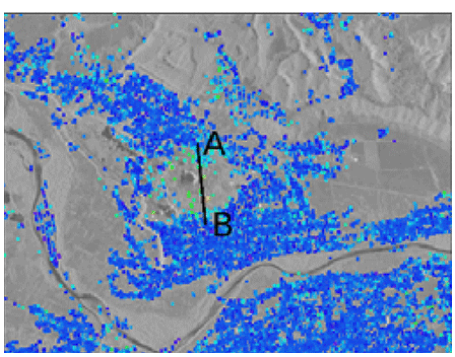
Tekintve, hogy a források koordinátái jól egyeznek az ismert bányaüregek elhelyezkedésével és a modellezett- és InSAR LOS elmozdulások között csak a felszálló-irányban jelentkezik számotte-



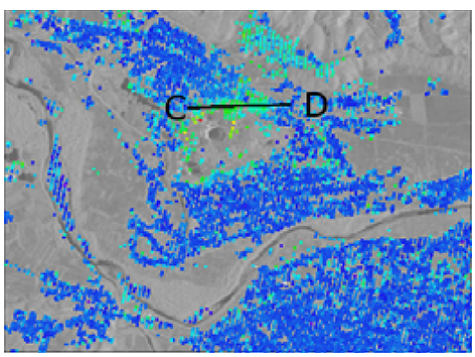
a)



b)



c)



d)

2.4.2. ábra. A forrásmodellezés alapján számított és az InSAR feldolgozásból meghatározott LOS elmozdulások (Szűcs et al. 2021). Az (a) ábra a felszálló-irányú LOS elmozdulásokat tartalmazza az AB profil mentén (c. ábra). A (b) ábra a leszálló-irányú LOS elmozdulásokat tartalmazza a CD profil mentén (d. ábra)

vő eltérés (2.4.2a. ábra) nagy valószínűséggel sikerült a felszíni elmozdulások felszín alatti forrásait azonosítani a GBIS módszerrel.

Az eredmények azonban rámutatnak az InSAR módszer korlátaira is. A deformációval sújtott területről csak részben sikerült információt szerezni a felszíni elmozdulásokról, ami a területet lefedő pixelek alacsony koherenciájának tudható be. A következő fejezetekben egy olyan módszert kívánok bemutatni, mellyel lehetséges alacsony koherenciával rendelkező területről is elmozdulási információt kinyerni.

Tézis 1: *Az ukrajnai Aknaszlatina területére InSAR módszerrel meghatározott LOS (műholdirányú) elmozdulások felhasználásával forrásmodellezést hajtottam végre a felszíni elmozdulások felszín alatti forrásainak meghatározására. A források kezdeti paramétereit a GBIS (Bagnardi és Hooper 2018) módszerrel pontosítottam, a végleges forrásparamétereket összevetettem a felhagyott sóbányákról rendelkezésre álló információkkal. A forrásparaméterek jó egyezést mutatnak az ismert bányaüregek kiterjedésével, a modellezett és az InSAR által meghatározott felszíni elmozdulások a felszállóirányban térnek el számottevően. A forrásmodellezést nehezítette, hogy az alacsony interferometrikus koherenciával rendelkező területekről nem volt lehetséges InSAR módszerrel információt szerezni a felszíni elmozdulásokról (Szűcs et al. 2021).*

3 Telepített sarokreflektorok visszaverési karakterisztikájának meghatározása

A reflektorok visszaverési karakterisztikái meghatározásra kerültek különböző módszerekkel (lásd 1.10. fejezet) azonban ahhoz, hogy megbizonyosodjunk arról, hogy a terepi IB-hez tartozó reflektorpárok valóban megfelelően jó visszaverési karakterisztikával rendelkeznek a SAR felvételek intenzitásadatai alapján is el kell végezni egy vizsgálatot.

Ebben a fejezetben először bemutatom a Magyarországon telepített IB hálózatokat, ezt követően pedig az eljárást, melyet a reflektorok SCR értékeinek meghatározására használtam, és az eljárás alapján számított SCR értékeket. A fejezetben bemutatott eljárás teszteléséhez a dunaszekcsői hálózatot lefedő Sentinel-1 felvételeket dolgoztam fel a 2.1. fejezetben bemutatott lépéseket alkalmazva.

3.1 Magyarországi lösz magaspartfalakhoz köthető földcsuszamlások

Magyarországon számos olyan földcsuszamlással sújtott terület található, melyek kialakulása negyedidőszaki lösz magaspartfalak omlásához köthető. Ezek a területek elsősorban a Balaton déli partján és a Duna mentén találhatóak.

A magaspartfalak stabilitásának, és a partfalak leszakadó blokkjainak mozgásának monitorozása, továbbá az epizodikusan bekövetkező földcsuszamlások vizsgálata kulcs eleme a partfalak közelében élő lakosok vagyoni- és életbiztonságának megőrzését célzó tevékenységeknek. A löszpartfal állapotának elemzéséhez és a földcsuszamlás dinamikájának megértéséhez szükséges többfajta, földtudományban használt, módszertan alkalmazása, ennek megfelelően a dunamenti lösz magaspartfalakat és a földcsuszamláshoz kapcsolódó kockázati tényezőket többen is vizsgálták Egri és Párdányi 1968; Pécsi et al. 1979; Szabó 2003.

A földcsuszamlás monitorozásának egyik fő komponense a leszakadó blokkok mozgásának geodéziai módszerekkel történő megfigyelése, mely több éves múltra tekint vissza. Újvari et al. 2009 és Mentes et al. 2012 geodéziai módszerekkel (precíz szintezés, GNSS precíz helymeghatározás, fúrólyukba helyezett dőlésmérők) meghatározott mérési eredményekre alapozva vizsgálták Dunaszekcső területén található dunamenti löszpartfalhoz köthető földcsuszamlás kinematikáját. Újvari et al. 2009 munkájában a szerzők meghatározott elmozdulásokat hidrológiai adatokkal is összevetették, és arra a következtetésre jutottak, hogy elsősorban a vízállásban bekövetkező változások, illetve a lehulló csapadék vezet szignifikáns mozgásokhoz.

Ahhoz, hogy az említett geodéziai módszerekkel kvázi-folyamatosan lehessen monitorozni a földcsuszamlás fejlődését, egyrészt szükséges terepi infrastruktúra kialakítása, másrészt a terepi mérések

rendszeres elvégzése. A dunaszekcsői hálózat esetén ez fúrólyukak- és geodéziai alappontként szolgáló vasbeton oszlopok kialakítását jelentette. A mérési infrastruktúra fenntartásának költsége nem jelentős, a terepi mérések rendszeres elvégzéséhez azonban szükség van megfelelő mennyiségű technikus és kutató jelenlétére, és jól karbantartott műszerekre.

A dolgozat bevezetőjében felvázoltam, hogyan lehet radarinterferometriával felszíni elmozdulásokat meghatározni. Ugyan az így meghatározott elmozdulások mind időben, mind térben egy adott referencia térbeli- és időponthoz képest értendőek, kiválóan kombinálhatóak más geodéziai eljárásokból származó adatokkal. Radarinterferometrikus elmozdulás-meghatározással tehát nem lehet teljesen kiváltani a terepi geodéziai méréseket, hanem technika arra ad lehetőséget, hogy a terepi mérések frekvenciáját csökkenteni lehessen az időbeli felbontás megtartásával, esetleg javításával.

3.2 Magyarországi IB hálózatok

Az ESA PECS projekt keretében Magyarországon négy IB hálózat jött létre. Egy teszt hálózat létesült Sopronban, ahol ugyan nem várhatók elmozdulások, viszont a nagycenki- és sopronbánfalvi obszervatóriumokban folyó geofizikai-, légkörfizikai-, és geodinamikai mérések felhasználásával vizsgálható, milyen hatással vannak a különböző nem-felszínmozgáshoz köthető tényezők a reflektorok esetén meghatározott interferometrikus fázisra.

Fontos megemlíteni, hogy kellően kis távolságokon (< 4-5 km) az atmoszféra hatása (mind a semleges atmoszféra, mind az ionoszféra esetén) konstansnak tekinthető. A Magyarországon belül telepített három „mozgó” hálózat esetén, a reflektorok között távolság nem haladta meg a 2 km-t. Ez azt jelenti, hogy, amikor a feldolgozás során a deformációval érintett reflektorok interferometrikus fázisából kivonjuk a referencia reflektor interferometrikus fázisát, az atmoszférikus hatás kiesik a különbségképzés során.

A további három hálózat aktív földcsuszamlások területein található, kettő hálózat dunamenti települések területén (Dunaszekcső, Kulcs), egy hálózat a Balaton partján (Fonyód). A Fonyódon található magaspartfal potenciális veszélyt jelent a partfal lábánál található házakra, vasútvonalra, autóutakra. Kulcs településen a földmozgások (legutoljára 2013-ban) komoly károkat okoztak a part mellett található épületekben (Udvardi et al. 2016; Király et al. 2023).

A három hálózat közül talán a dunaszekcsői hálózat a legaktívabb. 2007-ben egy lösz blokk elkezdett leválni a magaspartfalról, 2008-ban pedig egy nagyobb földmozgás volt tapasztalható (Újvari et al. 2009), ami egy újabb vető kialakulásához vezetett. A Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (akkoriban: Geodéziai és Geofizikai Intézet) 2007–2008 és 2009–2012 között végzett geodéziai méréseket (GNSS precíz helymeghatározás, szintezés, geodézai állomás, fúrólyukba telepített dőlésmérők) a település területén a 3D elmozdulások pontos meghatározására. A létrehozott geodéziai hálózat az újonnan telepített IB hálózattal a 3.2.3. ábrán látható. A korábban telepített geodéziai hálózat vasbeton oszlopai (100, 200, 300, 400, 500) a 3.2.3b. és 3.2.3c. ábrán sárga rajzszögekkel vannak jelölve. A dőlésméréshez kialakított fúrólyukakat (BT1, BT2) a 3.2.3c. ábrán fekete nyilak jelölik.

A három aktív területen telepített IB hálózat koordinátáit rendszeresen meghatároztuk GNSS mérésekkel is, kb. fél évente 2016.07.-2017.12.01. időszakban.

A fonyódi hálózat három, szemben álló elrendezésben telepített reflektorral (20%-os csonkolás) rendelkező IB-ből áll (lásd 3.2.1. ábra):

- „Ripka Emléktábla” (RE),
- „Kripta Villa” (KE),
- „Polgármesteri Hivatal” (PH, referencia IB).

A kulcsi hálózat öt, szemben álló elrendezésben telepített reflektorral (33%-os csonkolás, pánttal megerősítve) rendelkező IB-ből áll (lásd 3.2.2. ábra):

- „Vörös part” (A1),
- „Hullám és Deák út” (A2),
- „Kikötő” (A2),

3.2.1. ábra. A fonyódi IB hálózat, a Google Earth szoftverrel ábrázolva. A GNSS 1 és GNSS 2 pontok a GNSS mérésekhez telepített vasbeton oszlopokat jelölik

- „Strand” (A4),
- „Referencia IB” (R).

A dunaszekcsői hálózat négy, szemben álló elrendezésben telepített reflektorral (20%-os csonkolás) rendelkező IB-ből áll: IB1, IB2, IB3, IB4. lásd (3.2.3c. ábra). IB1 a referencia IB, a 400-as vasbeton oszlophoz és a BT1-es fúrólyukhoz közel található. IB2 a BT2-es fúrólyukhoz van közel. Az IB2 alatt található lösz blokk indult süllyedésnek 2008-ban. IB3 és IB4 a 2010-ben csuszamlásnak indult blokkon helyezkednek el. A 3.2.4. ábrán IB2-ről és IB3-ról készült képek láthatók, a képeken a GNSS méréshez használt antennával.

3.3 A kulcsi és dunaszekcsői IB hálózatok reflektorainak SCR értékei

Ugyan a telepített reflektorok elektromágneses tulajdonságainak a vizsgálata megtörtént (A. fejezet) többfajta módszerrel is kontrollált környezetben az egyik legfontosabb mérőszámot az ún. *Signal-to-Clutter Ratio*-t (továbbiakban SCR) elsősorban a terepi reflektorok intenzitásértékeinek felhasználásával lehet kiszámítani. Ehhez egy 8 hónapot felölelő időszakból (2017.04.–11.) dolgoztam fel 31 felszálló- és 36 leszálló irányú Sentinel-1 SLC felvételt, mind a dunaszekcsői mind a kulcsi hálózat esetén. A 2.1. fejezetben bemutatott feldolgozási lépéseket alkalmazva elkészítettem az RSLC képeket.

A Gamma szoftvercsomag alkalmazásával azonosítottam a két hálózat IB által dominált pixeleit az RSLC felvételeken belül. Az alkalmazott program egy kezdeti pixel körül keresi a lokális maximum intenzitásértéket az SLC képfájlban tárolt intentizásértékek felülmintavételezésével. A program a felülmintavételezett intenzitásértékek profilját is meghatározza azimut és range profilban. A lokális maximum meghatározása után elmenti a pixelhez tartozó SLC amplitúdó és fázisértékeket.

A dunaszekcsői hálózat IB3-as reflektorhoz tartozó normalizált intenzitás profilját mutatja be a

3.2.2. ábra. A kulcsi IB hálózat, a Google Earth szoftverrel ábrázolva. A GNSS 1 és GNSS 2 pontok a GNSS mérésekhez telepített vasbeton oszlopokat jelölik

3.3.1. ábra. A reflektorhoz tartozó intenzitásértékek jól elkülöníthetők a környezetüktől. A profilokon felfedezhető két másik csúcs egy közeli épület- és az IB2 reflektor hatásaként értelmezhető.

A Gamma programmal meghatároztam a dunaszekcsői és kulcsi IB hálózatok pixelkoordinátáit. Ezután elkészítettem az RSLC felvételekhez tartozó normalizált RMLI intenzitásképeket (σ_N). A σ_N értékeket a Gamma szoftvercsomag felhasználásával lehet meghatározni. A Gamma meghatározza a Small 2011 által definiált σ_E^0 (a továbbiakban σ_N-al jelölt) kiszámításához szükséges normalizációs faktorokat. A normalizációs faktorokat felhasználva lehet az RMLI képekből származtatni a σ_N képeket.

Minden IB esetén, az IB körüli kb. 100×100 m-es ablakban beolvastam a pixelekhez tartozó σ_N értékeket. Az ablakban található pixeleket melyeket egy lokális maximum intenzitás érték dominált, eltávolítottam és a maradék pixelek segítségével kiszámítottam a σ_N átlagát. Az átlagolást térben és időben is elvégeztem az ablakban válogatott pixelekre, az IB-hez tartozó pixelek esetén időben átlagoltam. Az átlagos σ_N értékek felhasználásával az (1.10.2) egyenlet alapján ki lehet számítani az IB reflektorokat jellemző SCR értékeket. A módszerrel meghatározott IB σ_N ($\sigma_{N,\mathrm{ref}}$), a háttér σ_N ($\sigma_{N,\mathrm{BG}}$) és a számított SCR értékeket a 3.3.1. táblázat tartalmazza.

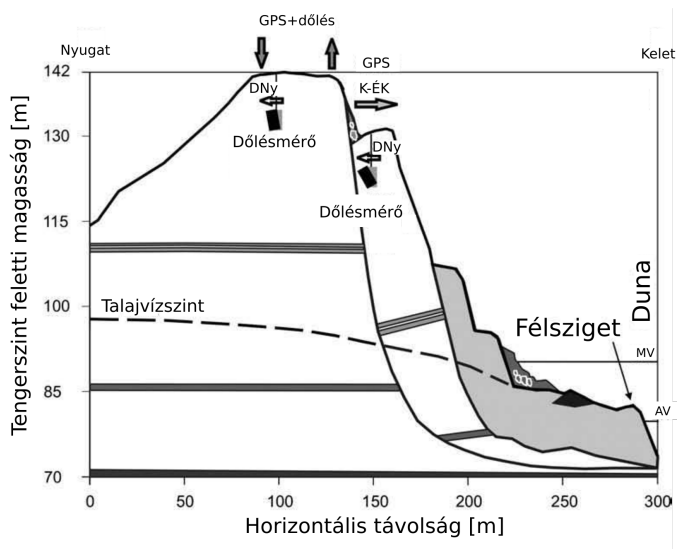
A becsült SCR értékek minimum értéke 60, maximum értéke 175 volt. Az (1.10.3) egyenletet felhasználva meg lehet becsülni, hogy a két SCR szélsőérték esetén, a LOS elmozdulás számítás szórása 0.4 mm és 0.2 mm. Mivel a hibaértékek mindkét esetben kisebbek mint 1 mm, kijelenthető, hogy az IB hálózatok reflektorai alkalmasak műhold LOS irányú felszíni elmozdulások radarinterferometrikus meghatározására szubmilliméteres pontossággal.

Tézis 2: *Saját eljárással meghatároztam két magyarországi, (Dunaszekcső, Kulcs), integrált geodéziai alappont-hálózathoz (IB-hálózat) tartozó reflektorpárok SCR (Signal-to-Clutter Ratio) értékeit. A feldolgozás során meghatároztam a reflektorokra vonatkoztatott és a reflektorok* 100×100 *m-es környezetében a normalizált intenzitásértékeket. A számított intenzitásértékek felhasználásával kiszámítottam a reflektorokhoz tartozó SCR értékeket, melyek alapján megbecsültem a radarinterferometrikus vizsgálat alapján meghatározható felszíni elmozdulásértékek várható hibáját, mely* 1 mm*-nél kevesebbnek adódott (Bányai et al. 2019a).*

a)

b)

c)

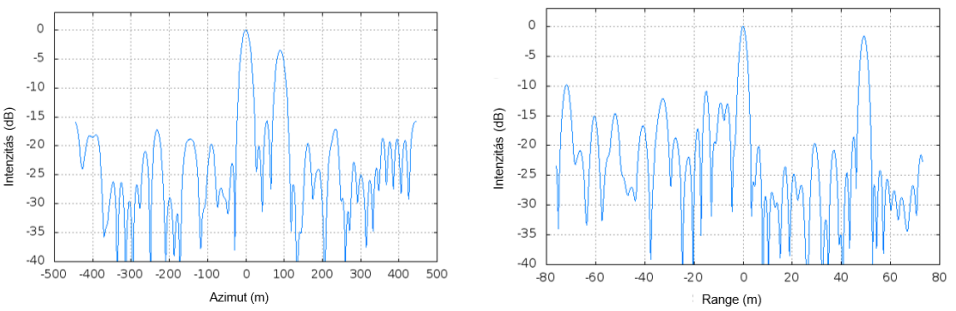


d)

3.2.3. ábra. A dunaszekcsői IB hálózat, a Google Earth szoftverrel ábrázolva, a földcsuszamlásról készült légifotóval, és a magaspartfal morfológiája sematikusan ábrázolva (d, módosítva Bányai et al. 2014 alapján). (a) A földcsuszamlásról a légifotót Körmendy László készítette 2008.02.17-én. b) A településen telepített vasbeton referencia oszlopokból alkotott geodéziai mérési hálózat, a település stabil részeinek monitorozására. c) A telepített IB hálózat (vörös telt körök) és a közelben található dőlésmérésekhez használható fúrólyukak (BT-1, BT-2) és vasbeton oszlopok (sárga rajzszögek). A d) ábrán jelölve vannak a korábbi mérésekhez használt fúrólyukak, amiben dőlésmérőket telepítettek, a „stabil" és a leszakadó blokkon. „MV" a magas-, „AV" az alacsony vízállás szintjét jelöli

a) **b)**

3.2.4. ábra. A dunaszekcsői hálózat magaspartfalra telepített két IB-je (a - IB2, b - IB3), GNSS helymeghatározás közben



a) **b)**

3.3.1. ábra. A dunaszekcsői hálózat egy IB reflektorának a Gamma programmal készített normalizált intenzitásprofilja azimut (a) és range (b) metszetben. A program az reflektorhoz tartozó intenzitás csúcshoz rögzíti az azimut és range koordinátarendszert (Bányai et al. 2018)

IB	**Felszálló**			**Leszálló**		
	$\sigma_{N,\mathrm{ref}}$	$\langle\sigma_{N,\mathrm{BG}}\rangle$	SCR	$\sigma_{N,\mathrm{ref}}$	$\langle\sigma_{N,\mathrm{BG}}\rangle$	SCR
Dunaszekcső						
IB1	8.347	0.074	113 (21 dB)	8.883	0.071	125 (21 dB)
IB2	11.061	0.065	171 (22 dB)	7.545	0.097	78 (19 dB)
IB3	9.567	0.055	175 (22 dB)	10.735	0.094	115 (21 dB)
IB4	8.742	0.058	151 (22 dB)	10.345	0.097	110 (20 dB)
Kulcs						
AR	7.781	0.099	79 (19 dB)	6.497	0.099	66 (18 dB)
A1	5.381	0.089	60 (18 dB)	6.258	0.098	63 (18 dB)
A2	9.019	0.077	91 (20 dB)	8.400	0.103	81 (19 dB)
A3	8.661	0.066	132 (21 dB)	8.174	0.100	82 (19 dB)
A4	5.803	0.057	102 (20 dB)	7.084	0.085	83 (19 dB)

3.3.1. táblázat. A dunaszekcsői és kulcsi IB hálózat reflektorainak, felszálló és leszálló irányú Sentinel-1 SLC felvételek alapján meghatározott, normalizált intenzitásértékei ($\sigma_{N,\mathrm{ref}}$), az IB 100×100 m-es környezetében meghatározott háttér ($\sigma_{N,\mathrm{BG}}$) normalizált intenzitásértékei, és a számított SCR (Signal-to-Clutter Ratio) értékek (Bányai et al. 2019a)

4 Az IB-k detektálása a SAR felvételeken

A geokódolás során (2.1.2. fejezet) kiszámított *lookup* táblát felhasználva minden, SAR felvételen belül található, WGS-84 koordinátához rendelhető egy interferogram vagy SLC pixel koordináta, mely alapján elméletben lehetséges lenne az IB-ket tartalmazó pixelek azonosítása. Azonban a gyakorlatban, a geokódolás vagy a terepmodell pontatlansága miatt, az IB WGS-84 koordinátához rendelt pixel nem tartalmazza magát az IB-t. Ezért szükséges egy algoritmust kidolgozni, mely képes kiválasztani azokat a pixeleket, melyek nagy valószínűséggel tartalmazzák az IB-ket. Ebben a fejezetben az ISIGN módszerhez fejlesztett detektálási algoritmust-, illetve az algoritmus alkalmazására egy példát mutatok be.

4.1 A detektálási algoritmus

Az ISIGN feldolgozás előkészítéseként a 2.1.4. fejezetben leírt módon el kell készíteni az interferogramokat, vagy el kell végezni az idősorelemzést.

Ha az interferogramokból indulunk ki, a feldolgozásban használt RSLC fájlokhoz tartozó RMLI fájlokat is el kell készíteni. Az RMLI adatokból kiszámolva az átlagos intenzitás értékeket egyetlen átlagos RMLI adatfájlt készítek. Az átlag számítást csak az IB hálózat környezetében definiált négyszög alakú területre végzem el. Egy 3×3-as szűrőt alkalmazva, megkeresem a lokális maximum értéket. Ha a lokális maximum nagyobb egy kiválasztott küszöbértéknél akkor a pixelt kiválasztom mint lehetséges IB-t. Ennek eredményeképpen IB kandidátus pixel koordinátákat kapok, melyek WGS-84 koordinátái meghatározhatók a geokódolási *lookup* tábla alapján.

Az idősorelemzés esetén nincs szükség az IB kandidátusok kiválasztására, mivel a StaMPS eljárás a feldolgozás kezdetén kiválaszt olyan kandidátus pixeleket, melyek interferometrikus fázisa megfelelően koherens a vizsgált időtartamon belül. A StaMPS feldolgozás végeredményeképpen meghatározom a LOS elmozdulás idősorokat a kiválasztott pixelekre, a pixelek WGS-84 koordinátájával együtt.

Tehát mindkét előfeldolgozási lépés végén IB kandidátus WGS-84 koordinátákat határozok meg. A IB kandidátus pixelekből ki kell választani a tényleges IB-ket. Először a k darab IB-hez tartozó paraméteregyüttest és az n darab IB-jelölt pixelhez tartozó adatokat beolvasom az adatfájlokból.

Feltételezve, hogy $k \leq n$, az n darab jelöltből $\frac{n!}{k!(n-k)!}$ módon lehetséges k pixelt kiválasztani. Végigiterálok az összes kombináción és kiszámítom a jelölt pixel koordináták és az ismert IB koordináták átlagát. Ezt követően kiszámítom a gömbi távolságot (d) az átlagos koordináták között:

$$d = R\cos^{-1}(\cos\Delta\varphi\cos\Delta\lambda) \tag{4.1.1}$$

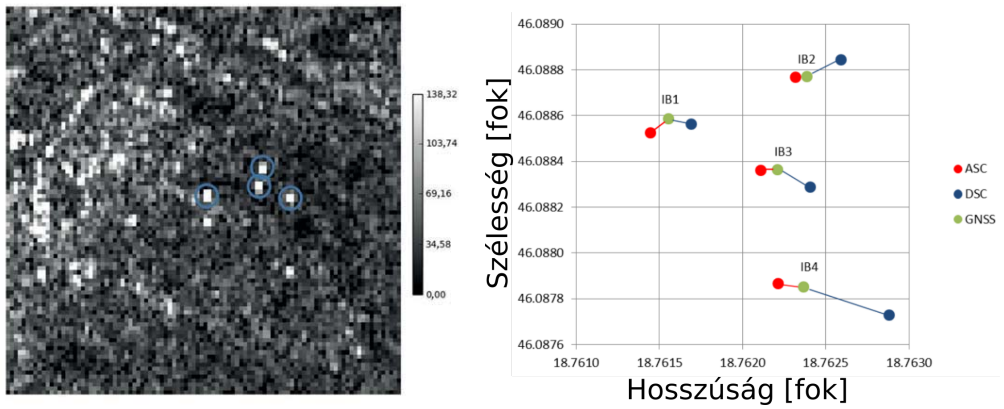
ahol, $\Delta\varphi$ szélességi szög-, $\Delta\lambda$ a hosszúsági szög különbség az átlagos koordináták között, $R = 6372\,\text{km}$ a Föld-sugár. Ha a d távolság nagyobb mint egy küszöbérték továbblépek a következő kombinációra, ha nem, az adott kombináció összes lehetséges permutációját kiszámítom és elmentem egy kimeneti adatfájlba.

Ezután kiszámítom a gömbi távolságokat a jelölt pixel koordináták és ismert IB koordináták (d_{ij}) között az összes permutációra (i a permutációt, j a kombinációt indexeli). Minden egyes kombinációra meghatározom az ún. távolság diszperziót:

$$\sigma_{d,j} = \sqrt{\frac{\sum_i d_{ij}}{k}}. \tag{4.1.2}$$

A minimum távolság diszperziós értékkel rendelkező kombináció és permutáció tekinthető megoldásnak.

Nem garantált, hogy a fent leírt automatizált algoritmus megfelelően azonosítja az IB hálózatokhoz tartozó pixeleket. Ekkor egy grafikus kezelőfelülettel rendelkező programot lehet alkalmazni. A program segítségével el lehet távolítani kandidátus pixeleket és manuálisan meg lehet határozni kandidátus pixel és IB párokat.



4.2.1. ábra. A dunaszekcsői IB hálózat reflektorainak pozíciói. a) A 2017.01.10. felszálló irányú Sentinel-1 felvételből származtatott normalizált intenzitáskép. Az intenzitásértékek nagyságát jelölő színskála nem-lineáris. Az IB reflektorok kék körökkel vannak megjelölve. (Bányai et al. 2018) b) A detektáló algoritmus által meghatározott IB pozíciók szélesség és hosszúság értékei. Vörös telt körök (ASC), jelölik a felszálló irányú, kék telt körök (DSC), a leszálló irányú felvételek alapján meghatározott IB koordinátákat. Zöld telt körök (GNSS) jelölik a GNSS mérések alapján meghatározott koordinátákat

4.2 A dunaszekcsői hálózat IB által dominált pixeleinek meghatározása

A dunaszekcsői hálózat IB pixeleinek meghatározásához és az algoritmus teszteléséhez a 3. fejezetben felhasznált Sentinel-1 SLC felvételeket dolgoztam fel. Ezekkel a felvételekkel elvégeztem a 2.1.4. fejezetben leírt feldolgozási lépéseket és alkalmaztam az előző fejezetben bemutatott algoritmust az IB pixelek azonosítására. A pixelek azonosítása megtörtént, melynek eredményeit a 4.2.1. ábra tartalmazza, azonban a leszálló irányú felvételekből meghatározott IB koordináták és a GNSS mérésekből meghatározott IB koordináták között számottevő különbség fedezhető fel, a leszálló irányú felvételekből meghatározott IB koordináták és a GNSS mérésekből meghatározott IB koordináták között szisztematikusan nagyobb az eltérés, mint a felszálló műholdpálya esetében.

A különbség magyarázata valószínűleg az intenzitás képek és interferogramok geokódolásában keresendő. A geokódolásnál a Gamma szoftver a DEM-ből származtatott intenzitásképpel keresztkorrelálja a felvételből számított intenzitásképet. A geokódoláshoz felhasznált 90 m-es SRTM modell a lösz blokk leszakadása előtt készült, és nem tartalmazza a blokk leszakadásánál kialakult új löszfalat.

Ez azt eredményezheti, hogy az új löszfalat azonosítja a geokódoló algoritmus a régi, a leszakadás előtt nyugatabbra helyezkedő, löszfalként, és a leszálló irányú képet keletebbre „helyezi el”. A probléma nem jelentkezik a felszálló irányú képeknél, mivel felszálló irányból nem „lát rá” a műhold a magaspartfal Duna felőli oldalára.

Tézis 3: *Eljárást dolgoztam ki a terepen telepített integrált geodéziai alappontok detektálására. A módszer először meghatároz kandidátus pixeleket a SAR (Szintetikus Apertúrájú Radar) képek átlagos intenzitás értékei alapján. A kandidátus pixelekből* $K = \frac{n!}{k!(n-k)!}$ *féleképpen lehet* k *darabot kiválasztani feltételezve, hogy* $k \leq n$*, ahol* k *az IB-k száma,* n *a kandidátus pixelek száma. A* K *lehetséges kombinációt az ismert IB koordináták és a kiválasztott pixel koordináták alapján szűröm, a szűrt kombinációk esetén kiszámítom az összes lehetséges permutációt. Ezzel a módszerrel meghatározott permutációk és kombinációk közül a koordináta különbségeken alapuló minimális távolságdiszperzióval rendelkezőt tekintem megoldásnak (Bányai et al. 2019a; Bozsó et al. 2020).*

5 Az IB-k fázisának kicsomagolása

5.1 A kicsomagolási algoritmus

Az IB pixelek azonosítása után szükséges az IB LOS elmozdulások meghatározása. Ha nem MTInSAR feldolgozást alkalmazunk szükséges elvégezni a fáziskicsomagolást az interferogramokból beolvasott detektált IB-khez tartozó fázis idősorokon, hogy meghatározzuk a kicsomagolt fázist és az IB LOS elmozdulásokat.

Az MTInSAR módszer alapú feldolgozások eredménye a kiválasztott pixelekhez rendelt LOS elmozdulási idősorok. Előfordulhat azonban, hogy a feldolgozás során a fáziskicsomagolás nem volt képes feloldani a ciklustöbbértelműséget. Ezért szükséges lehet a fáziskicsomagolási algoritmus újbóli alkalmazása, a detektált IB-khez tartozó LOS idősorok esetén. Ekkor a LOS elmozdulások visszakonvertálhatók fázis értékekre az (1.6.1) egyenlet alapján.

Az ISIGN módszerhez fejlesztett kicsomagolási algoritmus elve a „háromszoros különbségképzésen" alapul. Az első különbségképzés az interferogramok kiszámításánál történik, amikor egy mester és egy szolgakép között kiszámítom a fáziskülönbségeket. A második különbségképzés során a referencia IB fázis idősorát kivonom az összes többi IB fázis idősorából. A harmadik különbségképzés során a „mozgó" IB-k esetén pedig kiszámítom a fázis numerikus időbeli deriváltját és a derivált idősorokat ciklus egységekre konvertálom, úgy, hogy a differenciált értékeket elosztom 2π-vel. Az így kapott idősorban megkeresem a 0.45-nél nagyobb abszolút értékkel rendelkező pontokat és előjel szerint elvégzek egy ciklusugratást, azaz negatív érték esetén $+1$-et, pozitív előjel esetén -1-et adok hozzá a kiugró értékhez. Az így korrigált idősorra kumulatív összegzést alkalmazva és az eredményt 2π-vel megszorozva számítható ki a kicsomagolt fázis, melyet az (1.6.1) egyenlet felhasználásával lehet LOS elmozdulásokra konvertálni. Fontos megjegyezni, hogy a helyes fáziskicsomagolás így sem garantálható, mindenképpen szükséges a LOS elmozdulások összevetése a GNSS mérésekből számítható LOS elmozdulásokkal.

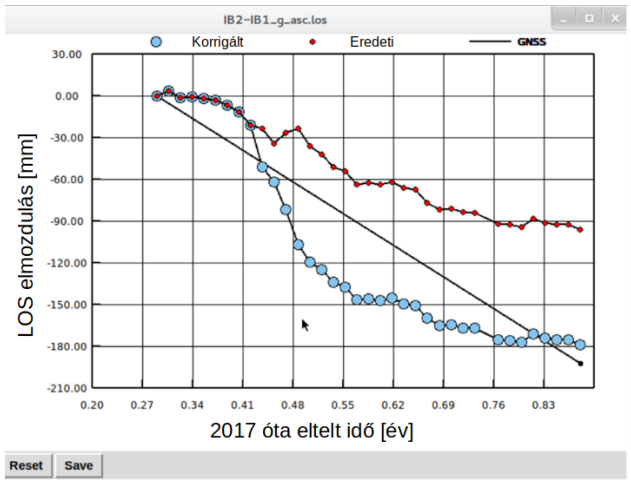
A fáziskicsomagolás helyességének ellenőrzésére egy grafikus program alkalmazható. A program beolvassa egy adott IB-hez tartozó, az ISIGN által generált, LOS elmozdulási idősort és az IB-hez tartozó GNSS mérésekből származtatott elmozdulásokat. A GNSS elmozdulásokat levetíti a LOS irányba és ábrázolja az IB LOS elmozdulásokkal együtt. Ismerve a GNSS elmozdulásokat a felhasználónak lehetősége van javítani a LOS elmozdulási adatsorokon. Egy adott időponthoz tartozó elmozdulás adatpontjára kattintva egy fél ciklushoz tartozó felszíni elmozdulás értékével tudja „ugratni" pozitív vagy negatív irányba a LOS elmozdulásokat, így korrigálva az esetleges kicsomagolási hibákat. A program használatát az 5.1.1. ábra mutatja be.

5.2 A kicsomagolási algoritmus alkalmazása a dunaszekcsői hálózatra

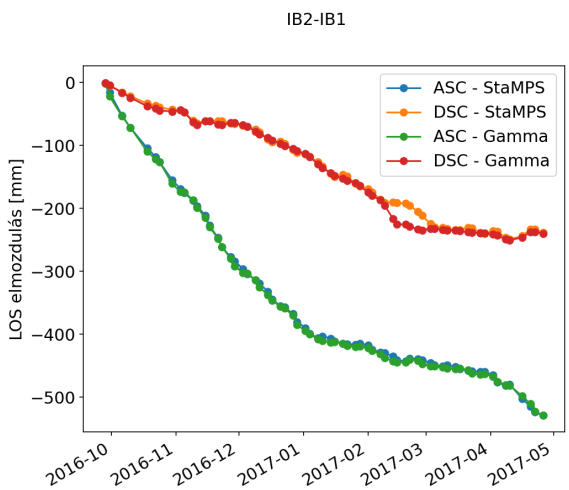
A kidolgozott fáziskicsomagolási algoritmus helyességének ellenőrzésére a 4.2. fejezetben is használt adatrendszert alkalmaztam. Az IB detektálás után elvégeztem a fáziskicsomagolást mind az interferogramokból beolvasott fázisokra, mind a StaMPS feldolgozással meghatározott LOS idősorokra. Az 5.2.1. ábrán a fáziskicsomagolás eredményeképpen kapott IB2 reflektor felszálló és leszálló LOS elmozdulásait ábrázoltam Gamma és StaMPS feldolgozás esetén. A két feldolgozás LOS elmozdulásai között csak egy kis eltérés tapasztalható a leszálló irányú (DSC) adatsorban, bár a LOS elmozdulási idősőrok végül ugyanabban az elmozdulási értékben érnek véget.

A StaMPS módszer az ún. SNAPHU algoritmust (Chen és Zebker 2003) használja a kiválasztott pixelek fázisának kicsomagolásához. Az itt bemutatott módszerhez képest a StaMPS feldolgozás és a SNAPHU kicsomagolás sokkal bonyolultabb módon határozza meg a LOS elmozdulásokat. Tekintve, hogy a StaMPS LOS elmozdulások nem térnek el számottevően a saját kicsomagolási módszerrel meghatározott LOS elmozdulásoktól kijelenthető, hogy a saját módszer alkalmas az IB LOS elmozdulások meghatározására.

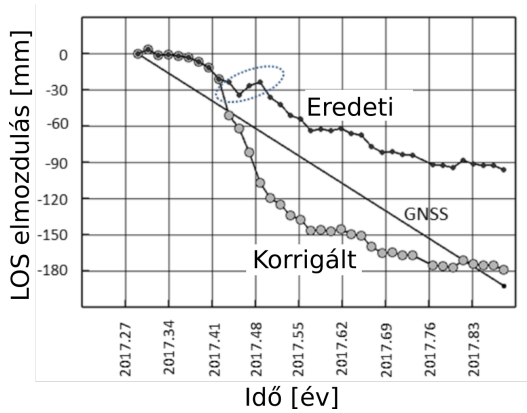
Ez az eredmény nem meglepő, hiszen a StaMPS és a SNAPHU algoritmus nagyságrendileg több



5.1.1. ábra. A manuális korrekcióhoz kifejlesztett program grafikus kezelőfelületének használata. A két fekete telt kör jelzi a két GNSS mérésből származtatott elmozdulások LOS irányba vetített komponensét. A két GNSS mérést reprezentáló pontot egy fekete vonal köti össze, segítve a fáziskicsomagolási korrekciók elvégzését. Az ISIGN által számított LOS elmozdulásokat a vörös telt körök jelölik, a manuálisan korrigált LOS elmozdulásokat a nagyobb világoskék telt körök. A **Reset** gombra kattintva lehet az eddig meghatározott ciklusugrásokat tisztázni és a folyamatot elölről kezdeni. A **Save** gombra kattintva lehet a korrigált adatsort elmenteni



5.2.1. ábra. Gamma és StaMPS feldolgozás alapján számított IB2 reflektor felszálló és leszálló LOS elmozdulások az IB1 reflektorhoz képest. Az ASC előtag a felszálló irányú, a DSC előtag a leszálló irányú LOS elmozdulásokat jelöli



5.2.2. ábra. A korrigált LOS elmozdulások. A nem-korrigált LOS elmozdulásokat a vörös telt körök jelölik, a manuálisan korrigált LOS elmozdulásokat a nagyobb világoskék telt körök (módosítva Bozsó et al. 2020 alapján)

ezer pixelből álló interferogram adatrendszer kezelésére és fáziskicsomagolására lett kifejlesztve, bár kétségtelenül alkalmas az IB hálózatok LOS elmozdulásainak a meghatározására.

A következő lépésben manuálisan korrigáltam a LOS elmozdulási adatsorokban jelentkező kicsomagolási hibákat. Egy példa LOS elmozdulási idősort mutat be az 5.2.2. ábra. Minden bizonnyal a korrigálást igénylő időszakban az elmozdulások sebessége olyan nagy volt, hogy a 6-napos Sentinel-1 visszatérési idő alatt több mint a hullámhossz felével (2.77 cm) mozdult el LOS irányba a löszblokk.

A kicsomagolási korrekciók elvégzéséhez elengedhetetlen, hogy a felhasználó rendelkezzen „helyi ismeretekkel", azaz tisztában legyen milyen felszíni elmozdulások várhatók a vizsgált területen, ezeknek az elmozdulásoknak mekkora a nagyságrendje és iránya. Jelen esetben ismert volt, hogy egy löszpartfal mozgásáról van szó, mely elsősorban keleti irányba mozog és süllyed, továbbá rendelkezésre álltak GNSS mérések. Ez a következőket jelentette:

- nem várhatók sem felszálló sem leszálló irányú LOS elmozdulások esetén nagy pozitív ugrások az idősorban,
- mivel a süllyedés sebessége nagyobb mint keleti irányú mozgás sebessége, ezért mind felszálló, mind leszálló esetben a LOS elmozdulásértékekben monoton csökkenő trend várható,
- a LOS idősort záró elmozdulás értéknek a GNSS által meghatározott elmozdulás értékbe kell „betalálni", vagy legalább megközelíteni a záróértéket.

A fenti meggondolások alapján végeztem el a fáziskicsomagolás korrekcióját.

Tézis 4: *Az ISIGN módszerhez (**I**ntegration of **S**entinel-1 **I**nterferometry and **G**NSS **N**etwork) fáziskicsomagolási eljárást fejlesztettem ki az IB hálózatok LOS elmozdulásainak meghatározására. Az eljárást alkalmaztam a dunaszekcsői IB hálózat LOS elmozdulásainak meghatározására. A LOS elmozdulásokat meghatároztam az irodalomból ismert módszerekkel is, névszerint a StaMPS idősorelemzéssel (Hooper et al. 2012). A StaMPS LOS elmozdulások és a saját módszerrel meghatározott elmozdulások között nem tapasztaltam számottevő eltérést. A fáziskicsomagolási eljáráshoz továbbá fejlesztettem egy grafikus felületű programot, amelyen a gyaníthatóan fáziskicsomagolási hibák* a priori *információk alapján korrigálhatóak (Bozsó et al. 2020).*

6 A dunaszekcsői IB hálózat elmozdulásainak meghatározása az ISIGN módszerrel

Ebben a fejezetben bemutatom a teljes ISIGN feldolgozási láncot. Ezt követi az ISIGN módszer alkalmazásának bemutatása, mely során meghatároztam a dunaszekcsői IB hálózat 3D elmozdulásainak idősorát.

6.1 Az ISIGN feldolgozási lánc

6.1.1 LOS vektorok kiszámítása

A terepi telepítésénél GNSS mérésekkel meghatározásra kerültek az IB hálózatok Descartes-koordinátái a WGS-84 referencia rendszerhez tartozó Földhöz rögzített (ún. *Earth Centered Earth Fixed*, ECEF) koordináterendszerben. A mesterkép adatfájlok tartalmazzák a felvételezés idejére érvényes műholdáthaladás koordinátáit és sebességvektor komponenseit, szintén WGS-84 ECEF rendszerben.

Az IB-hez tartozó LOS vektor kiszámításához meg kell határozni azt az időpontot és az időponthoz tartozó műholdpozíciót, amikor a műhold-IB távolság minimális volt az áthaladás során. Ebben a pozícióban a következő egyenletnek kell teljesülnie:

$$\mathbf{v}_{\text{sat}}(t)(\mathbf{x}_{\text{sat}}(t) - \mathbf{x}_{\text{IB}}) = 0, \tag{6.1.1}$$

ahol,

- $\mathbf{v}_{\text{sat}}(t)$ a műhold sebességvektora,
- $\mathbf{x}_{\text{sat}}(t)$ a műhold helyvektora,
- $\mathbf{x}_{\text{IB}}$ az IB helyvektora.

A Sentinel-1 felvételek esetén tipikusan 7-9 időpontban ismertek a műholdáthaladás hely- és sebességvektor komponensei.

A hely- és sebességvektor koordinátákat az SLC felvételekhez tartozó Gamma program által létrehozott paraméterfájlok tartalmazzák ami a Sentinel-1 adatfájlokból nyeri ki a koordinátákat. Egy műholdáthaladáshoz háromfajta koordinátapontosság érhető el, 100 cm (AUX_PREORB), 10 cm AUX_RESORB és 5 cm (AUX_POEORB) (*POD Products and Requirements - Ground Segment - Sentinel Online - Sentinel Online* é. n.). A Sentinel-1 adatfájlokban tartalmazott koordináták általában 100 cm pontossággal rendelkeznek. Ezeket a koordinátákat le lehet cserélni az 5 cm-es pontosságú koordinátákra, amik kb. 20 nappal a műholdáthaladás után érhetők el. Fontos megjegyezni, hogy az ebben a fejezetben bemutatott feldolgozások elvégzéséhez elegendő a 100 cm-es koordinátapontosság is.

A LOS vektor kiszámításához, először a hely- és sebességvektor koordinátákra polinomot illesztek. A műhold hely- és sebességkoordináták időbeli függése a következőképpen modellezhetők polinomokkal:

$$\mathbf{x}_{\text{sat}_j} = \sum_{i=0}^{n} a_{ij}(t - t_{\text{ref}})^i \tag{6.1.2}$$

$$\mathbf{v}_{\text{sat}_j} = \sum_{i=0}^{n} i a_{ij}(t - t_{\text{ref}})^{i-1}, \tag{6.1.3}$$

ahol,

- $j = x, y, z$ a hely- és sebességvektor egyik komponense,
- a_{ij} a j-ik koordináta, i-ik hatványhoz tartozó együtthatója,
- t az idő,
- t_{ref} a referencia időpont, az SLC adatfájlokban megtalálható hely- és sebességkoordináta rekordok időpontjainak középértéke.

A polinomillesztés után már tetszőleges időpontban kiszámíthatók a műhold hely- és sebességvektorok. A LOS vektort egy iteratív módszerrel lehet meghatározni. Először az áthaladási időtartomány legkorábbi és legkésőbbi időpontjaiban határozom meg a (6.1.1) egyenletben definiált skaláris szorzatot, ezután pedig az időtartomány közepén is. Ha a skalárszorzat értéke nagyobb mint $10^{-11}\text{m}^2/\text{s}$ akkor újra meghatározom három másik időpontban a skalárszorzatot. Ha a skalárszorzat értéke pozitív akkor az legkorábbi időpont helyett a középidőpontot használom, ha negatív, akkor a legkésőbbi időpont helyett a középidőpontot használom. Az új időtartományon kiszámítok egy újabb középidőpontot és kiszámolom a skalárszorzatokat. Az iteráció addig tart míg a skalárszorzat értéke kisebb nem lesz

$10^{-11}\mathrm{m}^2/\mathrm{s}$ értéknél.

Az iteráció végeztével az IB-hez rögzített koordinátarendszerben kiszámítom a műholdpozíciót és meghatározom az azimut- (α) és beesési (ζ) szögeket (lásd 1.8). Ezt a műveletet elvégezem az összes IB esetén a felszálló és leszálló irányú felvételekre is.

6.1.2 Korrekciók számítása a precíz geodéziai mérési eredményekkel

Geodéziai mérőállomás és szintezési adatok felhasználásával kiszámíthatók a reflektor fáziscentrum pozíciók, a GNSS mérés referencia pontjához képest. Ha két GNSS és geodéziai mérőállomás mérés adatai elérhetők, meghatározhatók az IB dőlése által okozott LOS elmozdulásokban jelentkező differenciák a referencia és a többi IB között a felszálló és leszálló irányban. A korrekciós lépés leírásához a következő jelöléseket vezetem be:

- a leszálló- (DC) és felszálló (AC) irányú reflektor sarokpozíciók,
- a leszálló- (DL) és felszálló (AL) irányban a hátsó láb felett található referencia pont,
- az északi (NM) és déli (SM) referencia pontok,
- a geodéziai referencia pont (GR),
- geodéziai mérőállomás (GM).

A 6.1.1. ábra egy reflektormodellen és egy telepített reflektoron mutatja be hol találhatók a felsorolt pontok egy IB-n.

A GR-hez képest meg lehet határozni az AC, DC, DL és AL pontok koordinátáit precíz mérésekkel. Az AC és DC koordinátákat kizárólag geodéziai mérőállomással lehet meghatározni, a többi koordinátát pedig további szintezéssel. Ismételt mérésekkel meg lehet határozni az IB-k geometriájában bekövetkezett változásokat, melyek közül kiemelten fontos a vasbeton alapzat dőlésében bekövetkezett változások.

GM mérések esetén az északi irányt átmenetileg helyettesíteni lehet a zéró vízszintes szöggel, ekkor a mért koordinátákat a következőképpen lehet felírni:

$$x = d \sin\xi \cos\theta \tag{6.1.4}$$

$$y = d \sin\xi \sin\theta \tag{6.1.5}$$

$$z = d \cos\xi - h_p, \tag{6.1.6}$$

ahol,

- d a ferde távolság a GM és a mért pont között,
- ξ a zenit szög,
- θ a horizontális szög,
- h_p a prizma magassága.

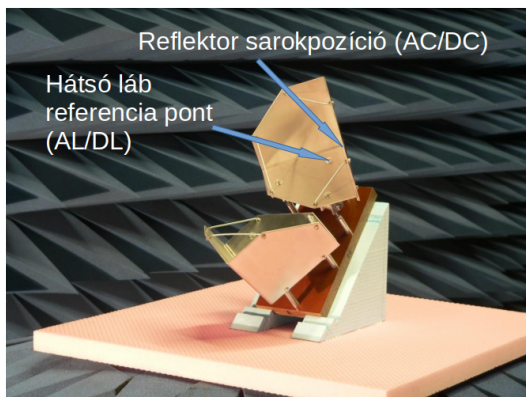
Első lépésben az x, y, z koordinátákat transzformálom a (6.1.4), (6.1.5), (6.1.6) egyenletek felhasználásával. A GM koordinátákat kivonva az összes többi koordinátából és egy forgatást alkalmazva, egy GM origójú topocentrikus koordinátarendszerbe helyezem a többi koordinátát. Feltételezve, hogy az AL és DL pontok által kijelölt irány egybeesik a kelet-nyugat iránnyal a forgatás szöge a következőképpen számítható:

$$\omega = \tan^{-1} \frac{x_{\mathrm{DL}} - x_{\mathrm{AL}}}{y_{\mathrm{DL}} - y_{\mathrm{AL}}} \tag{6.1.7}$$

Egy másik lehetőség a forgatási szög kiszámítására a GM-AC azimut irány meghatározása mágneses iránytű segítségével és a mért érték korrekciója a helyi deklináció értékével. Ebben az estben az elforgatás szöge:

$$\omega = \tan^{-1} \frac{y_{\mathrm{AL}}}{x_{\mathrm{AL}}} - \alpha_{\mathrm{AL}} \tag{6.1.8}$$

ahol α_{AL} a mért azimut.



a)

b)

6.1.1. ábra. Az IB dőlésének meghatározásához alkalmazott alappontok egy IB modellen (a) és egy terepen telepített IB-n (b) bemutatva. Az északi- (NM) és a déli (SM) referencia pontok a geodéziai referencia pont (GR) mellett találhatók meg, az IB talapzatán a GR-től északra és délre

A GM topocentrikus rendszerbeli koordináták a következőképpen számíthatók:

$$n = x\cos\omega + y\sin\omega \tag{6.1.9}$$

$$e = y\cos\omega - x\sin\omega \tag{6.1.10}$$

$$u = z \tag{6.1.11}$$

ahol n, e, u lokális GM origójú topocentrikus koordináták (lásd 1.8. fejezet). Ismételt mérés esetén a referencia- és az újonnan mért GM topocentrikus koordináták felhasználásával meg lehet határozni három forgatási szöget, mely referencia koordinátákat transzformálja oly módon, hogy egybeessenek az újonnan mért koordinátákkal legkisebb négyzetes értelemben. A legkisebb négyzetes kiegyenlítéshez használt egyenleteket a B. fejezet tartalmazza.

A forgatási szögek meghatározása előtt meg kell határozni egy skálázási faktort:

$$d_{\mathrm{C}} = sd_{\mathrm{R}} + v \tag{6.1.12}$$

$$s = \frac{\sum_i^N d_{\mathrm{C},i}}{\sum_i^N d_{\mathrm{R},i}}, \tag{6.1.13}$$

ahol,

- s a skálázási faktor,
- $d_{\mathrm{C},i}$ az ismételt-, $d_{\mathrm{R},i}$ a referencia mérés során meghatározott i-ik pont, GM koordinátarendszer origójától mért távolsága,
- v a reziduálok.

A skálázási faktor legkisebb négyzetes kiegyenlítéssel történő meghatározása során egységesen súlyozom a mért adatokat. Tapasztalataink szerint az n és e koordináták nem határozhatók meg 1.0 mm-nél jobb pontossággal, míg az u koordináták mérési pontossága jobb mint 0.1 mm. Ennek oka a mérési módszer különbsége: az n, e koordináták meghatározása geodéziai mérőállomással történik, az u koordinátáké szintezéssel. Ezért a forgatási szögek meghatározásánál az u koordináták súlya 100 míg az n és e koordinátáké 1.

A forgatási szögek meghatározásánál $\alpha = \beta = \gamma = 0$ a kiindulási értékeket alkalmazom. A legkisebb négyzetes kiegyenlítés iterálása addig történik, míg $\hat{\sigma_0}$ kisebb nem lesz mint 10^{-12}, vagy az iterációk száma el nem éri a 100-at.

A forgatási szögek segítségével meg lehet határozni az AC és DC fáziscentrumok relatív elmozdulását a GM-hoz képest, melyek alapján korrigálni lehet a LOS idősorokat.

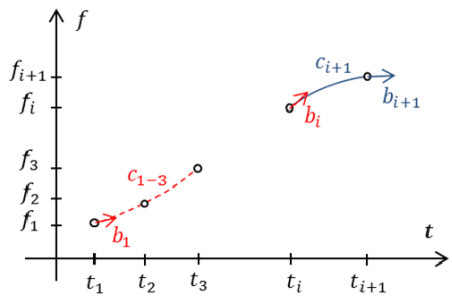
6.2 IB reflektorok adatainak importálása

A 4. és 5. fejezetekben részletezett módon lehetséges az IB pixelkoordináták azonosítása és az adott IB-hez tartozó fázisinformációk illetve LOS elmozdulások kinyerése. Ezután a LOS elmozdulási idősorok interpolációja következik.

6.2.1 A LOS elmozdulási idősorok interpolálása

A felszálló és leszálló irányú Sentinel-1 felvételek nem ugyanabban az időpontokban készülnek, emiatt a leszálló és felszálló IB LOS elmozdulás idősorokat interpolálni kell, úgy hogy a felszálló irányban meghatározott LOS elmozdulások ismertek legyenek a leszálló irányú elmozdulás adatok időpontjaiban és fordítva. Az interpoláció során az első-, az utolsó - és minden további köztes GNSS epocha időpontjára is interpolálni kell a felszálló és leszálló LOS elmozdulás adatokat. Az interpoláció az utolsó GNSS epocha időpontjával zárul. Ehhez szükséges, hogy az első GNSS epochát megelőzze legalább egy felszálló és egy leszálló LOS elmozdulás adatpont. Az utolsó GNSS epochát pedig követnie kell legalább egy felszálló és leszálló LOS elmozdulás adatpontnak.

A számítások során egy egyszerű lépcsőzetes másodfokú interpolációt alkalmazok, melyet részle-



6.2.1. ábra. Az interpoláláshoz használt polinom együtthatók meghatározása

tesen a következő alfejezetben (6.2.2 fejezet) mutatok be (angolul *stepwise quadratic interpolation*). Az interpoláció végén első GNSS epochához tartozó interpolált értéket kivonom az összes többi interpolált értékből, így biztosítva, hogy az első elmozdulás értéke nulla legyen.

6.2.2 Lépcsőzetes másodfokú interpoláció

Ebben az alfejezetben bemutatom a LOS adatok interpolálására használt algoritmust. Az interpoláláshoz használt polinomot a következő egyenlet írja le,

$$f(t) = a + bt + ct^2 \tag{6.2.1}$$

ahol t jelöli az időt. Kezdeti lépésként tekintsük az első három adatpontot, melyet a 6.2.1. ábra mutat be.

Az első ponthoz tartozó értéket kivonva a többi értékből és időpontból, a következő egyenletekhez jutunk,

$$\Delta f_2 = f_2 - f_1 \tag{6.2.2}$$
$$\Delta f_3 = f_3 - f_1 \tag{6.2.3}$$
$$\Delta t_2 = t_2 - t_1 \tag{6.2.4}$$
$$\Delta t_3 = t_3 - t_1. \tag{6.2.5}$$

Felhasználva a (6.2.1) egyenletet a következő egyenletrendszert kapjuk,

$$\Delta f_2 = b_1 \Delta t_2 + c_{1-3} \Delta t_2^2 \tag{6.2.6}$$
$$\Delta f_3 = b_1 \Delta t_3 + c_{1-3} \Delta t_3^2. \tag{6.2.7}$$

A felírt egyenletrendszer megoldása,

$$c_{1-3} = \frac{\Delta f_3 \Delta t_2 - \Delta f_2 \Delta t_3}{\Delta t_3^2 \Delta t_2 - \Delta t_2^2 \Delta t_3} \tag{6.2.8}$$
$$b_1 = \frac{\Delta f_2 - c_{1-3} \Delta t_2^2}{\Delta t_2}. \tag{6.2.9}$$

A $(t_1,\, f_1,\, b_1)$ és $(t_2,\, f_2)$ értékeket felhasználva a polinomot ki lehet értékelni egyik tartományról a következő tartományra haladva.

A polinom együtthatók meghatározása az általános esetben megadható a $(t_i,\, f_i,\, b_i)$ és $(t_{i+1},\, f_{i+1})$ adatpontokat felhasználva,

$$\Delta f_{i+1} = f_{i+1} - f_i \tag{6.2.10}$$
$$\Delta t_{i+1} = t_{i+1} - t_i \tag{6.2.11}$$
$$\Delta f_{i+1} = b_i \Delta t_{i+1} + c_{i+1} \Delta t_{i+1}^2. \tag{6.2.12}$$

A fenti egyenletrendszer megoldása,

$$c_{i+1} = \frac{\Delta t_{i+1} - b_i \Delta t_{i+1}}{\Delta t_{i+1}^2} \tag{6.2.13}$$

$$b_{i+1} = b_i + 2c_{i+1}\Delta t_{i+1}. \tag{6.2.14}$$

A b_i és c_{i+1} együtthatókat felhasználva pedig elvégezhető az interpolálás a $t_{i+1} - t_i$ tartományon.

6.2.3 A LOS és GNSS elmozdulási idősorok kombinálása Kálmán-szűréssel

A Kálmán-szűrés algoritmusát Rudolf Kálmán magyar származású villamosmérnök fejlesztette ki dinamikus rendszerek állapotának optimális becslésére (Kalman 1960). A szűrési algoritmus során egy rendszer ismert előző állapotából és az állapot „bizonytalanságából", az állapot varianciájából, meg lehet határozni egy ún. predikciós lépéssel a következő állapotát és varianciáit. Ha rendelkezésre állnak mérési adatok, továbbá a mérési adatok és a rendszer állapota között valamilyen függvénykapcsolat áll fent, akkor a következő állapotra kapott értékeket és varianciákat korrigálni lehet a mérési adatok értékeinek és a mérések varianciáinak figyelembevételével, ez az ún. korrekciós lépés. A predikciós és korrekciós a lépéseket tetszőleges lépésszámig lehet iterálni.

Esetünkben a rendszer állapota egy adott IB hely- és sebességkoordinátái a lokális ellipszoidi topocentrikus koordinátarendszerben, a mérési adatok az IB reflektorok radarinterferometriával meghatározott LOS elmozdulásai és az elmozdulási sebességek. A kapcsolatot Descartes-koordináták és a LOS elmozdulások között a műhold azimut- és beesési szögek felhasználásával lehet megteremteni.

A szűrési folyamat első lépése a predikció lépése. A predikciót leíró egyenlet:

$$\mathbf{x}'_i = \begin{bmatrix} n'_i \\ e'_i \\ u'_i \\ v'_{n,i} \\ v'_{e,i} \\ v'_{u,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{n}'_{i-1} \\ \hat{e}'_{i-1} \\ \hat{u}'_{i-1} \\ \hat{v}'_{n,i-1} \\ \hat{v}'_{e,i-1} \\ \hat{v}'_{u,i-1} \end{bmatrix} = \mathbf{T}\hat{\mathbf{x}}_{i-1}, \tag{6.2.15}$$

ahol,

- $\mathbf{x}_i^t = (n_i, e_i, u_i, v_{n,i}, v_{e,i}, v_{u,i})$ a „rendszer", jelen esetben az IB koordináták, állapotvektora a t_i időpontban,
- $\mathbf{x}_i'$ a predikcióval kapott új állapotvektor,
- $\hat{\mathbf{x}}_{i-1}$ az eggyel korábbi lépésből (predikció és korrekció) meghatározott állapotvektor, az első predikció esetén a kezdeti állapotvektor,
- $\mathbf{T}$ az ún. transzfer mátrix, mely a korábbi állapotból lépteti a következő állapotba a rendszert.

Tekintve, hogy elsősorban lassú felszíni elmozdulások figyelhetők meg a radarfelvételek sorozatával, feltételezem, hogy a sebességértékek jó közelítéssel valamilyen konstans értékkel rendelkeznek. Ekkor a következő koordináta egyszerűen számítható: $x_{i,j} = x_{i-1,j} + v_{i-1,j}\Delta t_i$, ahol $j = x, y, z$, $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ az epochák különbsége.

A IB állapotvektor (**x**) és a mérési adatok (**b**) között a következő egyenletek teremtik meg a kapcsolatot (Bozsó et al. 2020):

$$\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{x}' \tag{6.2.16}$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} l_A \\ v_{l_A} \\ l_D \\ v_{l_D} \end{bmatrix} \tag{6.2.17}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\cos\alpha_A \sin\zeta_A & -\sin\alpha_A \sin\zeta_A & \cos\zeta_A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\cos\alpha_A \sin\zeta_A & -\sin\alpha_A \sin\zeta_A & \cos\zeta_A \\ -\cos\alpha_D \sin\zeta_D & -\sin\alpha_D \sin\zeta_D & \cos\zeta_D & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\cos\alpha_D \sin\zeta_D & -\sin\alpha_D \sin\zeta_D & \cos\zeta_D \end{bmatrix} \quad (6.2.18)$$

ahol,

- l_A és l_D a felszálló és leszálló IB LOS elmozdulás értékek,
- v_{l_A} és v_{l_D} a felszálló- és leszálló IB LOS elmozdulási sebesség értékek,
- α_A, α_D a felszálló- és leszálló irányú azimut szögek,
- ζ_A, ζ_D a felszálló- és leszálló irányú beesési szögek.

Az eddigieket összefoglalva, az IB állapotvektor meghatározására alkalmazott Kálmán-szűrés lépéseit a következő egyenletek jellemzik:

$$\mathbf{x}'_i = \mathbf{T}\hat{\mathbf{x}}_{i-1} \quad (6.2.19)$$

$$\mathbf{Q}_{\mathbf{x}'_i} = \mathbf{T}\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_{i-1}}\mathbf{T}^t + \mathbf{Q}_{\mathbf{x}} \quad (6.2.20)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_i = \mathbf{x}'_i + \mathbf{K}(\mathbf{b}_i - \mathbf{A}\mathbf{x}'_i) \quad (6.2.21)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{Q}_{\mathbf{x}'_i}\mathbf{A}^t(\mathbf{Q}_{\mathbf{b}_i} + \mathbf{A}\mathbf{Q}_{\mathbf{x}'_i}\mathbf{A}^t)^{-1} \quad (6.2.22)$$

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_i} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{A})\mathbf{Q}_{\mathbf{x}'_i} \quad (6.2.23)$$

ahol,

- $\mathbf{K}$ a Kálmán-erősítésmátrix,
- $\mathbf{Q}_{\mathbf{x}}$ az IB állapotvektor bizonytalanságok kovariancia mátrixa,
- $\mathbf{Q}_{\mathbf{b}_i}$ a LOS elmozdulások variancia mátrixa,
- $\mathbf{Q}_{\mathbf{x}'_i}$ az IB állapotvektor variancia mátrixa a predikciós lépés után,
- $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}'_i}$ az IB állapotvektor variancia mátrixa a korrekciós lépés után.

A szűrés eredményeként kapott 3D elmozdulási idősorok a referencia IB-hez képesti elmozdulásként értelmezhetők. A szűrést el lehet végezni kizárólag LOS elmozdulási értékek felhasználásával a LOS elmozdulási sebességek nélkül. A szűrés „erőssége” a mérés kezdetén megadott variancia mátrixon keresztül hangolható.

A szűrés kezdetén beolvasom a GNSS mérésekből meghatározott elmozdulásokat és a mérési bizonytalanságokat amik alapján meghatározom a variancia mátrixok elemeit. A mérési bizonytalanságok meghatározása, „hangolása”, előzetes ismeretek és próba Kálmán-szűrések alapján történik. A kezdeti állapotvektor elemeinek lehet nulla értéket adni. Az így kapott koordináták el fognak térni a GNSS koordinátáktól a záró epochában.

Amennyiben két GNSS mérés áll rendelkezésre az állapotvektor sebességkomponenseinek értékét meg lehet becsülni a GNSS mérések alapján és a kezdeti állapotvektor sebességkomponenseiként felhasználni. Kezdeti sebességkomponens értékeknek felhasználhatók az irodalomból ismert komponensértékek amennyiben ezek rendelkezésre állnak. Egyéb mérési módszerek által meghatározott sebességértékek is alkalmazhatók erre a célra (pl. szintezés alapján meghatározott vertikális sebességkomponens). Az irodalom-, GNSS és más terepi mérések alapján meghatározott sebességek súlyozott kombinációja is felhasználható kezdeti értékként.

A felszálló- és leszálló LOS idősorokat újra lehet skálázni a GNSS LOS irányba vetített elmozdulásokkal az utolsó epochában. Ekkor, ha a LOS értékek hibával nem terhelt változók lennének (variancia mátrix főátlójának elemei 0-ák) a szűrés eredményeképpen kapott záró koordináták megegyeznének a GNSS mérésből meghatározott koordinátákkal, viszont ebben az esetben gyakorlatilag nem történne szűrés.

Ha feltételezzük, hogy LOS elmozdulások szórásértékei nem nullák, de nagyobbak mint a GNSS méréseket terhelő hibák, akkor a maradék koordináta különbségeket egy újabb skálázással ki lehet küszöbölni.

Amennyiben nem cél az, hogy a Kálmán-szűréssel létrehozott 3D elmozdulási görbe a záró GNSS mérés időpontjában megegyezzen a GNSS mérés alapján meghatározott 3D elmozdulási koordiná-

tákkal, más megoldás is alkalmazható. Például számítható skálázási faktor oly módon, hogy a LOS elmozdulások időpontjaiba interpolált GNSS LOS elmozdulások és a Sentinel-1 LOS elmozdulások közötti eltérés minimális legyen legkisebb négyzetes, vagy valamilyen más metrika szerinti, értelemben. Ebben az esetben azonban a 3D elmozdulási görbe lényegében „együtt futna" a GNSS mérés által meghatározott egyenessel, gyakorlatilag értelmetlenné téve az InSAR feldolgozásból kapott elmozdulások kombinálását a GNSS mérésekkel.

6.3 A dunaszekcsői hálózat elmozdulásainak meghatározása

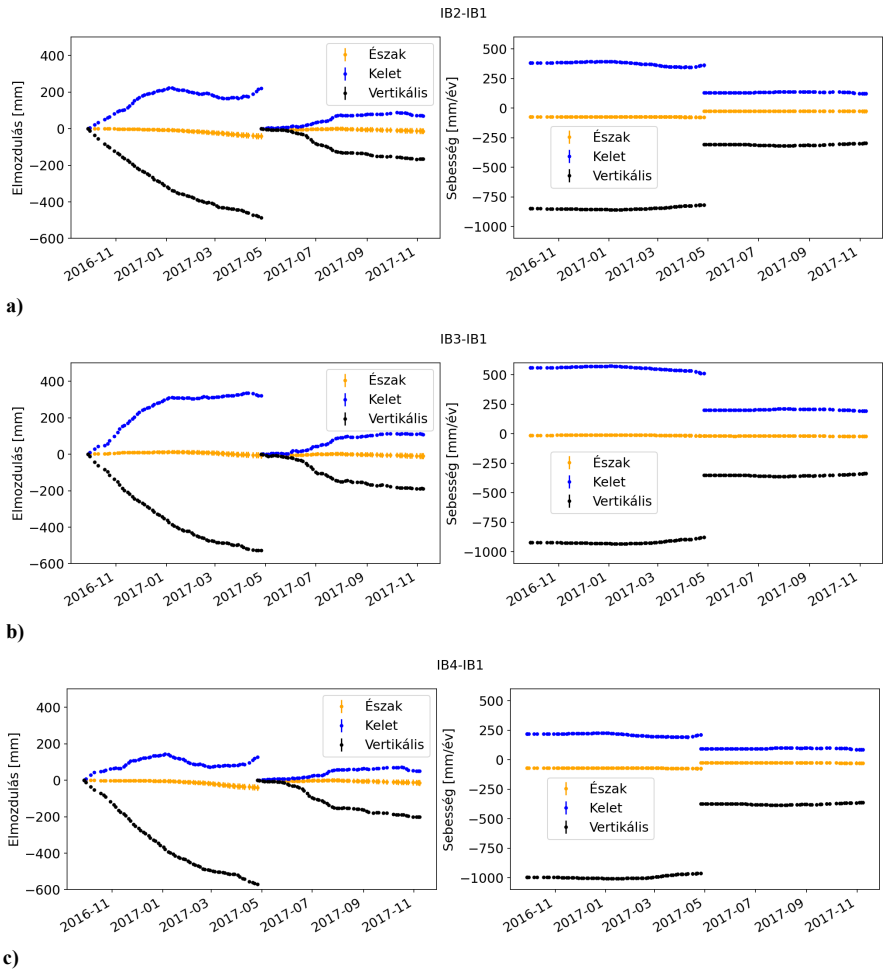
A 2.1. és 6.1. fejezetben bemutatott módszerrel meghatároztam a dunaszekcsői IB hálózat 3D elmozdulásait lokális topocentrikus koordinátarendszerben. A feldolgozás során két 2016.09.28–2017.04.26. és 2017.04.26–2017.11.08. közötti periódust dolgoztam fel. Az adatrendszer 3 GNSS epochát tartalmazott. Az első periódus 38 felszálló- és 35 leszálló irányú, a második periódus 36 felszálló- és 31 leszálló irányú képet tartalmazott. A feldolgozás során elkészítettem az interferogramokat és elvégeztem a StaMPS feldolgozást mind felszálló mind leszálló irányban. Az interferometrikus feldolgozáshoz a 90m-es SRTM (Jarvis et al. 2008) modellt használtam fel a SAR felvételek geokódolásához és a topográfiai fázistag kiszámításához. Az első időszakhoz köthető felszíni elmozdulások eredményei a Bozsó et al. 2020 publikációban, a két időszak együttes feldolgozásának eredményei a Bányai et al. 2023 publikációban találhatóak meg.

A kicsomagolási hibák manuális korrekciója után elkészítettem az interpolált LOS elmozdulás idősorokat és a elvégeztem a LOS elmozdulások és GNSS elmozdulások Kálmán-szűrését. A két periódusra külön alkalmaztam a Kálmán-szűrést, hogy megvizsgáljam, hogyan teljesít két eltérő felszíni elmozdulás dinamikával rendelkező időszakban. A kezdeti IB koordinátáknak nulla kezdeti bizonytalanságot határoztam meg, a LOS elmozdulásoknak 2 mm szórásértéket határoztam meg. A záró epochánál kapott IB koordináta komponensekhez a szűrés a következő szórásértékeket határozta meg komponensek szerint, az első periódusban: észak - 16.9 mm, kelet - 1.8 mm, vertikális - 2.7 mm. A második periódusban nagyon hasonló értékeket határozott meg a szűrés: észak - 16.3 mm, kelet - 1.8 mm, vertikális - 2.6 mm. A felvételezési geometria miatt a LOS elmozdulások lényegében „érzéketlenek" az észak-déli irányú elmozdulásokra, ezért lett az északi komponenshez rendelt szórásérték sokkal nagyobb. Az észak-déli elmozdulásokra elsősorban a GNSS mérések szolgáltatnak információt.

A feldolgozás során kapott IB helykoordinátákat- és sebességkomponenseket a 6.3.1. ábra tartalmazza. Mindegyik IB kb. 0.5 m-et süllyedt az első periódusban a referencia IB-hez képest és átlagosan kb. 17.5 cm-et mozdult kelet fele. Ez azt jelenti, hogy 2008-ban és 2010-ben leszakadt két lösz blokk nem stabilizálódott, hanem mozgásban vannak. Az észak-dél irányban nem történt számottevő elmozdulás, a komponens elmozdulási idősora lényegében végigköveti a GNSS elmozdulások által kijelölt egyenest. A második periódusban az elmozdulások sokkal kisebbek voltak: kb. 150 mm vertikális süllyedés, 70 mm kelet felé mozgás.

Az IB-k vertikális elmozdulásai nagyon hasonló mintázatot követnek, a keleti komponensben azonban van eltérés. A keleti komponens idősorát tekintve a IB2 és IB4 korrelál egymással, annak ellenére, hogy az IB3 és IB4 tartózkodnak egy lösz blokkon. Ennek egy lehetséges magyarázat, hogy az lösz blokk melyen az IB3 és IB4 tartózkodott is két blokkra vált szét. Az új blokk melyen az IB4 tartózkodik elkezdett az IB2-es blokkal együtt mozogni.

Az IB vertikális sebességek értéke az első periódusban igen nagy, a -800-tól -900 mm/évig terjedő tartományba esik, ez majdnem 1 m/év. Bányai et al. 2014 meghatározták GNSS mérések alapján számos ponton a lösz blokkok sebességkomponenseit. A mérési adatsorban volt olyan időszak, amikor az átlagos vertikális sebesség elérte a -700-tól -800 mm/évig terjedő tartományt. Minden bizonnyal az első periódus által bennfoglalt időszakban a lösz blokkok egy hasonlóan intenzív süllyedésen mentek keresztül. A második periódusban az elmozdulási sebességek sokkal kisebbek, vertikális komponens kb. 270 mm/év, keleti komponens 130 mm/év, tehát ebben az időszakban a lösz blokkok mozgása nem állt meg, de sokkal stabilabbak voltak. Ez jól egyezik Bányai et al. 2014 által meghatározott dinamikával, mely szerinte a lösz blokkok mozgását aktív és stabilabb periódusok jellemzik.



6.3.1. ábra. A dunaszekcsői hálózatra ISIGN feldolgozás által meghatározott IB helykoordináta- és sebesség idősorok a becsült szórésértékekkel (a - IB2, b - IB3, c - IB4). A koordináták az IB1 referenciához képesti elmozdulásokat jelölik

Tézis 5: *Az ISIGN módszerrel kiszámítottam a dunaszekcsői IB hálózat lokális topocentrikus koordinátarendszerben értelmezett koordinátáinak idősorát egy mozgások szempontjából aktívabb (2016.09.28–2017.04.26) és stabilabb (2017.04.26–2017.11.08) időszakra. Ehhez először elvégeztem az InSAR feldolgozást felszálló- és leszálló irányú Sentinel-1 felvételek felhasználásával, majd alkalmaztam az ISIGN módszert. A módszer által meghatározott elmozdulási sebességek az aktívabb és stabilabb időszakban nagyságrendileg jól egyeznek a Bányai et al. 2014 által, GNSS mérések felhasználásával, megállapított sebességekkel, illetve a tanulmányban foglalt tapasztalatokkal, miszerint a lösz blokkok mozgásában periodikusan előfordulnak aktívabb és stabilabb időszakok (Bozsó et al. 2020; Bányai et al. 2023).*

7 Az értekezés tézisei és összefoglalás

Az új módszer fejlesztéséhez és alkalmazásához kapcsolódó tevékenységem eredményei tételesen:

1. Az ukrajnai Aknaszlatina területére InSAR módszerrel meghatározott LOS (műholdirányú) elmozdulások felhasználásával forrásmodellezést hajtottam végre a felszíni elmozdulások felszín alatti forrásainak meghatározására. A források kezdeti paramétereit a GBIS (Bagnardi és Hooper 2018) módszerrel pontosítottam, a végleges forrásparamétereket összevetettem a felhagyott sóbányákról rendelkezésre álló információkkal. A forrásparaméterek jó egyezést mutatnak az ismert bányaüregek kiterjedésével, a modellezett és az InSAR által meghatározott felszíni elmozdulások a felszálló-irányban térnek el számottevően. A forrásmodellezést nehezítette, hogy az alacsony interferometrikus koherenciával rendelkező területekről nem volt lehetséges InSAR módszerrel információt szerezni a felszíni elmozdulásokról (Szűcs et al. 2021).
2. Saját eljárással meghatároztam két magyarországi, (Dunaszekcső, Kulcs), integrált geodéziai alappont-hálózathoz (IB-hálózat) tartozó reflektorpárok SCR (Signal-to-Clutter Ratio) értékeit. A feldolgozás során meghatároztam a reflektorokra vonatkoztatott és a reflektorok 100×100 m-es környezetében a normalizált intenzitásértékeket. A számított intenzitásértékek felhasználásával kiszámítottam a reflektorokhoz tartozó SCR értékeket, melyek alapján megbecsültem a radarinterferometrikus vizsgálat alapján meghatározható felszíni elmozdulásértékek várható hibáját, mely 1 mm-nél kevesebbnek adódott (Bányai et al. 2019a).
3. Eljárást dolgoztam ki a terepen telepített integrált geodéziai alappontok detektálására. A módszer először meghatároz kandidátus pixeleket a SAR (Szintetikus Apertúrájú Radar) képek átlagos intenzitás értékei alapján. A kandidátus pixelekből $K = \frac{n!}{k!(n-k)!}$ féleképpen lehet k darabot kiválasztani feltételezve, hogy $k \leq n$, ahol k az IB-k száma, n a kandidátus pixelek száma. A K lehetséges kombinációt az ismert IB koordináták és a kiválasztott pixel koordináták alapján szűröm, a szűrt kombinációk esetén kiszámítom az összes lehetséges permutációt. Ezzel a módszerrel meghatározott permutációk és kombinációk közül a koordináta különbségeken alapuló minimális távolságdiszperzióval rendelkezőt tekintem megoldásnak (Bányai et al. 2019a; Bozsó et al. 2020).
4. Az ISIGN módszerhez (**I**ntegration of **S**entinel-1 **I**nterferometry and **G**NSS **N**etwork) fáziskicsomagolási eljárást fejlesztettem ki az IB hálózatok LOS elmozdulásainak meghatározására. Az eljárást alkalmaztam a dunaszekcsői IB hálózat LOS elmozdulásainak meghatározására. A LOS elmozdulásokat meghatároztam az irodalomból ismert módszerekkel is, névszerint a StaMPS idősorelemzéssel (Hooper et al. 2012). A StaMPS LOS elmozdulások és a saját módszerrel meghatározott elmozdulások között nem tapasztaltam számottevő eltérést. A fáziskicsomagolási eljáráshoz továbbá fejlesztettem egy grafikus felületű programot, amelyen a gyaníthatóan fáziskicsomagolási hibák *a priori* információk alapján korrigálhatóak (Bozsó et al. 2020).
5. Az ISIGN módszerrel kiszámítottam a dunaszekcsői IB hálózat lokális topocentrikus koordinátarendszerben értelmezett koordinátáinak idősorát egy mozgások szempontjából aktívabb (2016.09.28–2017.04.26) és stabilabb (2017.04.26–2017.11.08) időszakra. Ehhez először elvégeztem az InSAR feldolgozást felszálló- és leszálló irányú Sentinel-1 felvételek felhasználásával, majd alkalmaztam az ISIGN módszert. A módszer által meghatározott elmozdulási sebes-

ségek az aktívabb és stabilabb időszakban nagyságrendileg jól egyeznek a Bányai et al. 2014 által, GNSS mérések felhasználásával, megállapított sebességekkel, illetve a tanulmányban foglalt tapasztalatokkal, miszerint a lösz blokkok mozgásában periodikusan előfordulnak aktívabb és stabilabb időszakok (Bozsó et al. 2020; Bányai et al. 2023).

7.1 Összefoglalás

Magyarországon számos olyan terület található, ahol szükség lehet felszíni elmozdulások rendszeres monitorozására. Ezeken a területeken az emberi tevékenységhez, vagy a természetes folyamatokhoz köthető felszínmozgások pontos megfigyelése segíthet a komoly károkat okozó események súlyosságának enyhítésében, esetlegesen a káresemények előrejelzésében. A geodéziai terepi mérések (GNSS pontos helymeghatározás, szintezés, geodéziai mérőállomás) megfelelő pontosságot nyújtanak, azonban a mérések kivitelezése sokszor igen költséges, és emberi erőforrás igényes. A mérések számának ritkításával korlátozni lehet a költség- és erőforrás igényeket, viszont ez a megoldás potenciálisan a felszíni elmozdulások alulmintavételezéséhez vezet.

Dolgozatomban bevezetőjében a felszíni elmozdulások megfigyelésének, és egy relatíve új távérzékelési módszer, az ún. Szintetikus Apertúrájú Radar (röviden SAR) alkalmazásának, elméleti és történeti hátterét mutattam be. A műholdas SAR felvételek felhasználhatók „klasszikus" földmegfigyelési alkalmazásokhoz pl. felszínfedettség kategorizálása, árvízzel sújtott területek lehatárolása. A SAR felvételben tartalmazott fázisinformáció interferometrikus feldolgozásával (röviden InSAR) a Föld felszínén bekövetkezett elmozdulások megfigyelése is lehetséges. InSAR módszerrel azonban csak a műhold irányú, ún. line-of-sight (LOS) elmozdulás határozható meg és a LOS elmozdulások is csak relatív értelemben. A módszer egy másik korlátja, hogy az elmozdulások meghatározásához szükséges terepi szórópontok jelenléte. Amennyiben ilyen szórópontok nem találhatók meg a vizsgált területen, mesterséges szórópontokat kell telepíteni.

Az InSAR módszer hatékonyságát egy példa alkalmazáson keresztül demonstráltam: az ukrajnai Aknaszlatina településre meghatározott InSAR elmozdulások alapján modellezést végeztem el a meghatározott elmozdulások felszín alatti forrásainak paraméterbecslésére. Ezután bemutattam egy ESA PECS (*Integrated Sentinel-PSI and GNSS technical facilities and procedures for the determination of 3D surface deformations caused by environmental processes*; 4000114846/15/NL/NDe) és NKFIH NKP (*Magyarország szeizmotektonikai veszélyeztetettségi térképének megalkotása és elemzése*; 2018-1.2.1-NKP-2018-00007) projekt keretén belül kifejlesztett új módszert, az ún. ISIGN módszert, mellyel kombinálni lehet a „klasszikus" geodéziai terepi módszerek- és InSAR által meghatározott elmozdulásokat. Részleteztem az új módszer terepi alkalmazásához szükséges sarokreflektorok tervezésének lépéseit és a sarokreflektorok, InSAR és GNSS alapú, 3D elmozdulásainak meghatározására fejlesztett új módszert is. A leírásban különös hangsúlyt fektettem a módszerhez kapcsolódó saját fejlesztésekre. A dolgozatot az ISIGN módszer alkalmazásának eredményeit bemutató fejezet zárja, amely tartalmazza a dunaszekcsői földcsuszamlásra meghatározott 3D elmozdulási idősorok kiszámításának módját és a számítások eredményeit.

7.2 Summary

There are several areas in Hungary where repeated measurement of surface displacements may be necessary. In such areas accurate observing of surface displacements caused by natural processes or human activities could help mitigate or potentially predict events that cause serious damages. Geodetic methods (GNSS precise positioning, leveling, geodetic station measurements) on the field are sufficiently accurate, however regular field measurements could be resource intensive. By reducing the frequency of measurements it is possible to reduce resource costs, but this could lead to the undersampling of surface deformations.

In the opening chapter I have introduced the theoretical and historical background of the observation of surface displacements and the application of a relatively new remote sensing method, the

so-called Synthetic Aperture Radar (SAR for short) imaging. Satellite SAR images can be used for „classical" Earth observation e.g. categorizing surface coverage, delineating flooded areas. The interferometric processing of the phase information (InSAR for short) contained in a SAR image enables the observation of deformations on the surface of the Earth. Using the InSAR method, it is only possible to determine the satellite line-of-sight (LOS) component of surface displacements in a relative sense. Another drawback of the method is the absence of persistent- or permanent scatterers on the field. If such scatterers are missing, artificial scatterers must be installed.

I have demonstrated the effectiveness of the InSAR method through an example application: I carried out modelling, based on InSAR derived deformations to determine the underground source parameters of surface deformations in Solotvyno, Ukraine. I have introduced a novel methodology, the so-called ISIGN method, that is capable of combining surface displacements derived from InSAR and „classic" geodesic field measurements. The ISIGN method was developed in the framework of an ESA PECS (*Integrated Sentinel-PSI and GNSS technical facilities and procedures for the determination of 3D surface deformations caused by environmental processes*; 4000114846/15/NL/NDe) and an NKFIH NKP (*Creating and analyzing the seismomectonic model of Hungary*; 2018-1.2.1-NKP-2018-00007) project. I have detailed the design of the corner reflectors needed for the application of the ISIGN method and the development of the method, capable of determining 3D IB displacements based on InSAR and GNSS measurements. I have placed extra emphasis on the developments I have carried out during the development of ISIGN. The closing chapter showcases the results of applying the ISIGN method for the Dunaszekcső landslide, describing the calculation of 3D displacement time series for the IB network.

Köszönetnyílvánítás

Doktori tanulmányaim és tevékenységem során rengeteg embertől kaptam segítséget bíztatást, és útmutatást. A dolgozat nem jöhetett volna létre nélkülük.

Hálás köszönettel tartozom, elsősorban témavezetőimnek: Szűcs Eszternek és Lichtenberger Jánosnak. Köszönöm, hogy elindítottak ezen a pályán és egyengették szakmai fejlődésemet. A Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (FI) és ELTE „szenior" kötelékéből Bányai Lászlónak, Wesztergom Viktornak és Szabó Csabának szeretnék köszönetet mondani, akik szakmai és emberi oldalról is támogatták doktori pályafutásomat. Hálás köszönettel tartozom a FI-n belül és kívül tevékenykedő kutatóknak: Bozóki Tamásnak, Szárnya Csillának, Rubóczki Tibornak, Buzás Attilának, Kuslits Lukácsnak, Czirok Lilinek, Békési Eszternek, Porkoláb Kristófnak, Kovács Istvánnak, Lange Thomasnak, Kővágó Ákosnak, Gelencsér Orsinak, Spránitz Tamásnak, Berkesi Mártának, Hencz Mátyásnak; akikkel nem csak szakmailag, de elsősorban barátilag is nagyon jól együtt tudunk dolgozni. Remélem még sokszor beszélgetünk, nem csak kutatásról, az intézet berkein belül.

Az utrechti egyetemen eltöltött szűk 4 hónap alatt számos kutatóval ismerkedtem meg, akik emberileg és szakmailag is támogattak kint tartózkodásom során, nekik is köszönettel tartozom: Ylona van Dinther, Liviu Matenco, Nemanja Krstekanic, Antoine Auzemery, Job Arts, Meng Li, Mohsen Goudarzi.

A doktori dolgozatomban tárgyalt kutatás nem jöhetett volna létre Bányai László által vezetett ESA PECS projekt (4000114846/15/NL/NDe), és Wéber Zoltán vezetése alatt megvalósuló NKFIH NKP (2018-1.2.1-NKP-2018-00007) projektek támogatása nélkül.

Nem utolsó sorban nagyon nagy hálával tartozom családomnak és barátaimnak, akik a legnehezebb időszak alatt is mellettem álltak és átsegítettek minden akadályon.

A doktori dolgozat módosított, az ESA által feldolgozott Copernicus Sentinel-1 adatot tartalmaz (2023). (Contains modified Copernicus Sentinel data, 2023)

Függelék

A Mesterséges reflektorok tervezése és vizsgálata

A.1 Reflektor geometriák analitikus vizsgálata

Elektromágneses értelemben nagy (a tárgy mérete $\gg$ hullámhossz) tárgyak esetén a RCS értéke közelíthető az ún. hatásos felülettel, azaz a tárgy azon felületének területével mely befolyásolja az elektromágneses hullámok visszaverődését.

Feltételezve, hogy a beérkező elektromágneses hullám harmonikus síkhullám:

$$P_{\text{in}} = S_{\text{in}} A_{\text{eff}} \tag{A.1.1}$$

ahol

- P_{in} a céltárgyra beérkező elektromágnese hullám teljesítménye,
- S_{in} a céltárgyra beérkező elektromágneses hullám teljesítménysűrűsége,
- A_{eff} a céltárgy hatásos felülete.

A hatásos felület az elektromágneses értelemben nagy és veszteségmentes (tökéletesen vezető) tárgyak esetén közelíthető a tárgy teljes felületének a beérkező elektromágneses hullám terjedési irányára merőleges síkra vetített értékével.

Elhanyagolva a szórt teljesítmény beesési szög függését és monosztatikus esetet vizsgálva a szórt teljesítmény (S_{sc}) a következőképpen számítható:

$$S_{\text{sc}} = G \frac{P_{\text{in}}}{4\pi r^2} \tag{A.1.2}$$

ahol

- G a tárgy, jelen esetben reflektor, nyeresége (angol irodalomban *target gain*, egy izotróp szórótárgy esetén 1.0)
- r a radar távolsága a vizsgált tárgytól

A hatásos felület és a nyereség közötti kapcsolat:

$$G = 4\pi \frac{A_{\text{eff}}}{\lambda^2}. \tag{A.1.3}$$

Az (A.1.1)–(A.1.3) egyenletek alapján a RCS,

$$\sigma_{\text{m}} = \lim_{r\to\infty} 4\pi r^2 \frac{S_{\text{sc}}}{S_{\text{in}}} = \lim_{r\to\infty} 4\pi r^2 \frac{G\frac{P_{\text{in}}}{4\pi r^2}}{S_{\text{in}}} = \frac{G P_{\text{in}}}{S_{\text{in}}} \tag{A.1.4}$$

$$\sigma_{\text{m}} = \frac{\left(4\pi \frac{A_{\text{eff}}}{\lambda^2}\right)\left(S_{\text{in}} A_{\text{eff}}\right)}{S_{\text{in}}} = 4\pi \frac{A_{\text{eff}}^2}{\lambda^2} \approx 4\pi \frac{A_{\text{geom}}^2}{\lambda^2}, \tag{A.1.5}$$

ahol A_{geom} a reflektor hatásos keresztmetszetének geometria megfontolások alapján becsült értéke.

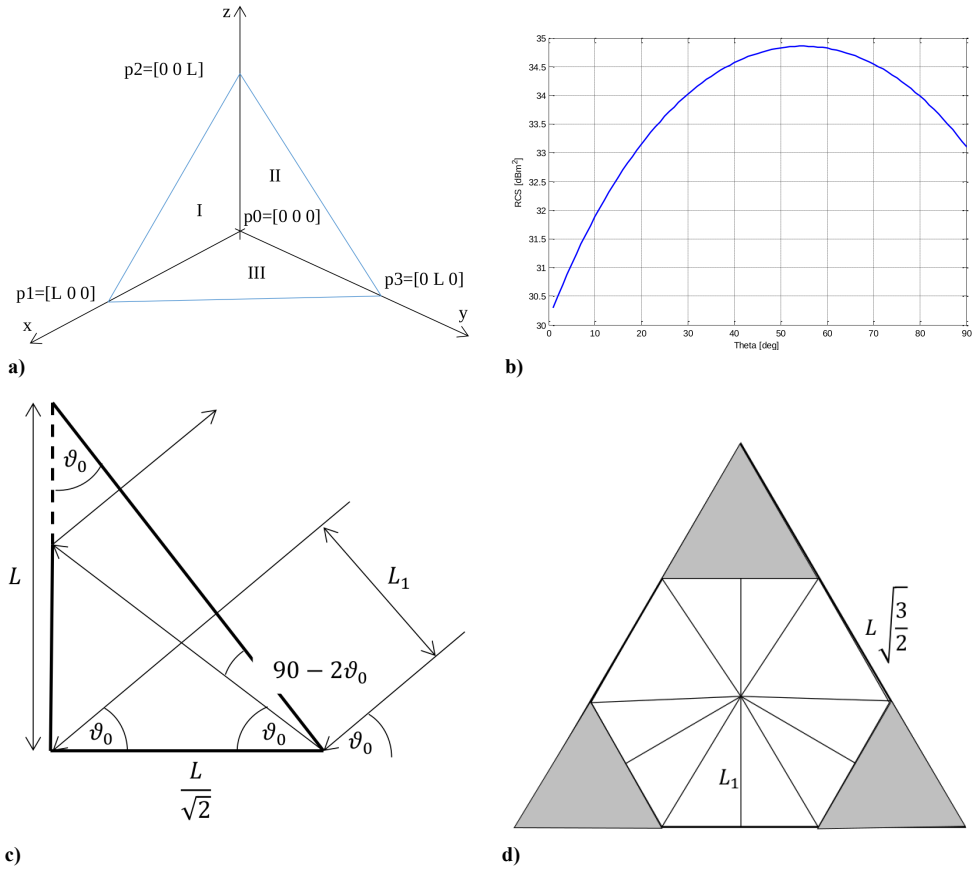
Tehát ha ismerjük a vizsgált tárgy hatásos felületét megbecsülhetjük az RCS értékét. A fejezet hátralévő részében néhány sarokreflektor geometria RCS értékének kiszámítását mutatom be a fent ismertetett elméleti megfontolások alapján.

Az elméleti RCS értékek kiszámítása az 1.10.2. ábrán jelölt azimut- és beesési szögek felhasználásával lehetséges. A háromszög reflektor hatásos felületének kiszámításához, helyezzük el a reflektort az A.1.1a. ábrán bemutatott koordinátarendszerbe.

A hatásos terület a három reflektor lap, az elektromágneses hullám beesési irányára merőleges síkra vetített területéből áll:

$$A_{\text{eff}} = A_1 + A_2 + A_3 \tag{A.1.6}$$

ahol $A_{1,2,3}$ az A.1.1a. ábrán jelölt háromszög reflektor I,II, és III oldallapjainak területét jelöli. A



A.1.1. ábra. A hatásos felület (hatásos keresztmetszet) és RCS számítása geometriai megfontolások alapján. a) A számításhoz használt koordinátarendszer, a $p_0 \dots p_3$ pontok segítségével kiszámítható egy L élhosszúságú háromszög reflektor hatásos felülete (Bányai et al. 2019b; Nagy 2020). b) a hatásos felület alapján számított RCS értékek a beesési szög függvényében háromszög reflektor esetén ($L = 1\,\text{m}$, $f = 5.405\,\text{GHz}$, $\alpha = 45°$). c) A háromszög reflektor oldalnézetből a direkt és kettős visszaverődések sugárutakkal együtt ábrázolva. d) Háromszögű reflektor geometriája. L a reflektor élhosszát jelöli, a szürkével jelölt területek nem vesznek részt a mikrohullám visszaverésében, amennyiben kettős visszaverődés történik (c ábra). A szürke területek eltávolításával, a reflektor csonkolásával, érhető el az ötszög reflektor geometria

három terület egység a következőképpen számítható:

$$\mathrm{A}_1 = \frac{1}{2}|(\mathbf{p'}_1 - \mathbf{p'}_0) \times (\mathbf{p'}_2 - \mathbf{p'}_0)| \tag{A.1.7}$$

$$\mathrm{A}_2 = \frac{1}{2}|(\mathbf{p'}_2 - \mathbf{p'}_0) \times (\mathbf{p'}_3 - \mathbf{p'}_0)| \tag{A.1.8}$$

$$\mathrm{A}_3 = \frac{1}{2}|(\mathbf{p'}_3 - \mathbf{p'}_0) \times (\mathbf{p'}_1 - \mathbf{p'}_0)| \tag{A.1.9}$$

A transzformált $\mathbf{p'}$ sarokpontokba mutató vektorok számítása elvégezhető egy projekciós mátrix alkalmazásával: $\mathbf{p'}_i = \mathbf{R} \cdot \mathbf{p}_i$, ahol

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} -\cos(\alpha)\sin(\vartheta) & -\sin(\alpha)\sin(\vartheta) & \cos(\vartheta) \\ \sin(\alpha) & \cos(\vartheta) & 0 \\ -\cos(\alpha)\cos(\vartheta) & -\sin(\alpha)\cos(\vartheta) & -\sin(\vartheta) \end{bmatrix} \tag{A.1.10}$$

A számított RCS értékek beesési szögfüggését az A.1.1b ábra mutatja be, adott azimut szög esetén. Az RCS görbe maximális értékét a $\vartheta = 55°$ értéknél éri el. A fent bemutatott egyenletek alapján a

maximális RCS érték ($L = 1\,\mathrm{m}$, $f = 5.405\,\mathrm{GHz}$, $\lambda = 55.504\,\mathrm{mm}$):

$$\mathrm{RCS} = 3\pi\frac{L^4}{\lambda^2} = 3060\,\mathrm{m}^2 \rightarrow 34.86\,\mathrm{dBm}^2 \tag{A.1.11}$$

Amennyiben kettős visszaverődéssel (lásd A.1.1c. ábra, a mikrohullám a vízszintes reflektorlapra érkezik, arról visszaverődve és a függőleges reflektorlapra érkezve és visszaverődve terjed a beeséssel ellentétes irányba) történik a reflexió, a hatásos felület értéke lecsökken (az A.1.1d ábrán a szürkével jelölt területek nem vesznek részt az elektromágneses hullám visszaverésében).

Ebben az esetben a hatásos felület a maximuma $\tan\vartheta_0 = \frac{L/\sqrt{2}}{L} = \frac{1}{\sqrt{2}} \rightarrow \vartheta_0 = 35.264^\circ$, beesési szögnél található. Ekkor geometriai megfontolások alapján (A.1.1c.-d. ábra) a hatásos felület a következőképpen számítható:

$$A_{\mathrm{eff}} = 3L^2\frac{1}{\sqrt{3}}\sin^2\vartheta_0 = \frac{L^2}{\sqrt{3}}. \tag{A.1.12}$$

A RCS pedig (felhasználva az (A.1.11) egyenletnél alkalmazott értékeket és A.1.4 összefüggést):

$$\sigma_{\mathrm{m}} = \frac{4}{3}\pi\frac{L^4}{\lambda^2} = 1360\,\mathrm{m}^2 \rightarrow 31.34\,\mathrm{dBm}^2 \tag{A.1.13}$$

Hasonló meggondolások alapján ki lehet számítani a négyzetlapú- és a negyedkör reflektor hatásos felületét és RCS értékét. A két reflektortípus (háromszög és négyszög) maximum hatásos felületét és RCS értékét kétszeres visszaverődés esetén az 1.10.1 táblázat tartalmazza.

A.2 Reflektor és integrált alappontok (IB) mechanikai tervezése

A numerikus szimulációk alapján az ötszög reflektorok akkor biztosítanak megfelelően magas RCS értékeket relatíve pontatlan terepi irányzás mellett, ha relatív csonkolás mértéke nem éri el a 0.4-et (40%-ot). Ez alapján két reflektor geometria került kiválasztásra egy 20%-osan és egy 33%-osan csonkolt. Egy méter reflektor oldalhossz esetén ez $0.2\,\mathrm{m}$ és $0.333\,\mathrm{m}$-es abszolút csonkolásnak felel meg. A csonkolás mértékén kívül a reflektorok párban történő elrendezésében is van egy szabadsági fok. A reflektorpárokat lehet szemben álló és háttal álló geometriában elrendezni egy integrált alapponton belül. Az analóg vizsgálatok elvégzésénél (A.3. fejezet) a szemben álló és a háttal álló elrendezés szerint kialakított IB kerültek vizsgálatra. A telepített reflektorok esetén csak a szemben álló geometria került alkalmazásra.

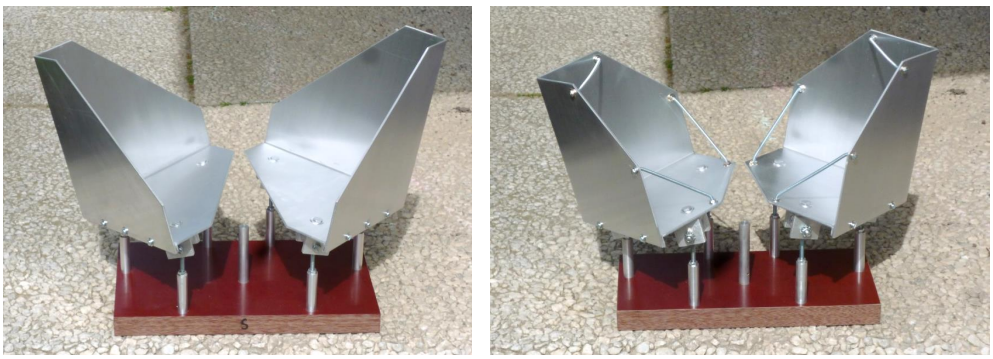
A nagyobb (33%-os) relatív csonkolással előállított reflektor két fontos előnnyel rendelkezik: a kisebb reflektorméret kevésbé érzékeny a környezeti hatásokra (erős széllökések, csapadék, hőhatások), továbbá a reflektorpárt tartalmazó IB alapterülete is kisebb, megkönnyítve a terepi telepítést és csökkentve a szükséges alapanyag mennyiséget.

Maga az IB a következő főbb elemekből áll: a reflektorpár, foglalatok és adapterek GNSS és szintezési, illetve gravitációs mérések elvégzéséhez és a vasbeton alapzat. Az integrált pont alapzata egy téglatest alakú vasbeton szerkezet, melynek nagy része a föld felszín alatt található, a téglatest felszíne nagyjából egybeesik a talajszinttel.

A reflektorok lapjainak illeszkedése egymáshoz merőleges kell legyen. A reflektorok két elemből állnak: egy kettős háromszög „külső” elemből, és egy „alap” elemből.

Mindkét elem esetén lehetséges csonkolást elvégezni a háromszögek csúcsától indulva. A külső elemet a szimmetriatengelye mentén, a szimmetriatengelyre merőlegesen meghajlítva össze lehet illeszteni az alap elemmel. Mindkét elemen megtalálható egy sáv, mely a háromszög alapon kívül helyezkedik el és esztergált csavarmenetek találhatóak meg rajta. A két elemet a csavarmenetek mentén összeillesztve, csavarokkal lehet egymáshoz erősíteni.

Egy reflektort három lábbal lehet az IB alapzatához erősíteni. A lábak nem csak a reflektor lapok stabilitását biztosítják, hanem lehetővé teszik a reflektorok irányzását kb. 0.3° pontossággal. Egy IB terepi telepítésénél az IB-hez tartozó reflektorpár irányzását a fel- és leszálló műhold áthaladáshoz kell



a) b)

c)

A.2.1. ábra. Az analóg mérések elvégzéséhez használt ötszög (csonkolt háromszög) reflektorok 1:5 méretarányú modelljei (Bányai et al. 2019b). a) IB modell 20%-os relatív csonkolással rendelkező reflektorpárral, szemben álló elrendezésében A reflektor szerkezete pántokkal is megerősítésre került. b) IB modell 33%-os relatív csonkolással rendelkező reflektorpárral, szemben álló elrendezésében c) IB modell 20%-os relatív csonkolással rendelkező reflektorpárral, háttal álló elrendezésében

beállítani.

A két különböző reflektor geometriához (szemben álló elrendezés, 20% és 33%-os relatív csonkolással) két különböző alapterületű, de lényegében ugyanolyan szerkezetű alapzat tartozik. Az alapzatok tartalmazzák a reflektor lábak foglalatát, a GNSS, és gravitációs mérésekhez, illetve szintezéshez szükséges adaptereket.

Az A.3. fejezetben tárgyalt analóg mérések elvégzéséhez készültek $1:5$-ös méretarányú IB modellek (A.2.1. ábra). Az IB modellek háromfajta elrendezésben kerültek megvalósításra:

- 20%-os relatív csonkolású reflektorok, reflektorpárok szemben álló elrendezésben
- 33%-os relatív csonkolású reflektorok, reflektorpárok szemben álló elrendezésben
- 20%-os relatív csonkolású reflektorok, reflektorpárok háttal álló elrendezésben

A.3 Reflektor karakterisztikák meghatározása analóg kísérletekkel

A.3.1 Bevezetés

Az eddigi bemutatott vizsgálati módszerek egy reflektor RCS karakterisztikájának meghatározására voltak alkalmasak idealizált körülmények között. A terepen azonban a reflektorok nem önmagukban, hanem párokban kerülnek telepítésre, ezért szükséges azt is megvizsgálni, hogy befolyásolják-e egymás visszaverési karakterisztikáit és amennyiben igen, milyen mértékben. A RCS mérése a különböző pár geometriákban analóg mérésekkel végezhető el.

A pár-geometriák vizsgálatának elvégzése nagyon körülményes lenne egy terepen telepített ref-

lektorpárra. Ehhez szükség lenne a reflektorpár(ok) tényleges terepi telepítésére, a RCS méréséhez szükséges felszerelés terepre szállítására és a mérések elvégzésére. Ez azonban igen költséges lenne, ugyanis a legtöbb esetben a reflektorpár telepítése előtt szükséges méréseket végezni a telepítéshez legmegfelelőbb hely kiválasztásához, mely tovább nehezítené a mérések elvégzését.

A terepen telepített reflektorpáron végzett mérés helyett el lehet végezni a kísérletet reflektor modellekből alkotott párokon. A reflektormodellek a valós reflektorok kicsinyített makettjei, melyeket elektronikusan visszhangmentes laborban elhelyezve elvégezhető a RCS karakterisztika kísérleti meghatározása. Ezt a módszert széleskörben alkalmazzák a hadi- és repülőgép iparban céltárgyak RCS karakterisztikájának meghatározására.

A.3.2 Skálázási faktor kiszámítása

A kicsinyített modell skálázási faktorának meghatározásához az első két Maxwell-egyenlet használható fel. Feltételezve, hogy a tárgyra beérkező elektromágneses hullám monokromatikus, azaz $\{\mathbf{E}(\mathbf{r},t),\mathbf{H}(\mathbf{r},t)\}=\{\mathbf{E_0}(\mathbf{r}),\mathbf{H_0}(\mathbf{r})\}e^{i\omega t}$ és felhasználva a differenciális Ohm-törvényt ($\mathbf{j}=\sigma\mathbf{E}$):

$$\nabla\times\mathbf{E}=-i\omega\mu\mathbf{H} \tag{A.3.1}$$

$$\nabla\times\mathbf{H}=\sigma\mathbf{E}+i\omega\varepsilon\mathbf{E} \tag{A.3.2}$$

ahol,

- $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$ az elektromos térerősség vektora,
- $\mathbf{H}(\mathbf{r},t)$ a mágneses térerősség vektora,
- $\mathbf{j}(\mathbf{r},t)$ az áramsűrűség vektora,
- ω az elektromágneses hullám körfrekvenciája,
- μ a mágneses permeabilitás,
- ε az elektromos permittivitás,
- σ a vezetőképesség,
- $i=\sqrt{-1}$ az imaginárius egység.

A mérési geometriában minden koordináta és a tárgyak dimenziója n-szer kisebb mint az „eredeti”, valós koordinátarendszerben. Az anyagi jellemzők σ,ε,μ a koordináták ($\mathbf{r}$) ismert függvényei, ismert továbbá a mérésben használt elektromágneses hullám frekvenciája $f=\omega/(2\pi)$.

Annak érdekében, hogy a skálázott anyagi jellemzők $\sigma_s,\varepsilon_s,\mu_s$ és frekvencia $f_s=\omega_s/(2\pi)$, ugyanazt az elektromágneses mezőt eredményezze a skálázott rendszerben fel kell állítani egy kapcsolatot az ismert anyagi jellemzőkkel és mérési frekvenciával.

Tekintve, hogy

$$\frac{\partial\mathbf{E}_s}{\partial x_s}=\frac{\partial\mathbf{E}_s}{\partial x/n}=n\frac{\partial\mathbf{E}_s}{\partial x} \tag{A.3.3}$$

a Maxwell-egyenletek a skálázott koordinátarendszerben a következőképpen írhatók fel:

$$n\nabla\times\mathbf{E}_s=-i\omega_s\mu_s\mathbf{H}_s \tag{A.3.4}$$

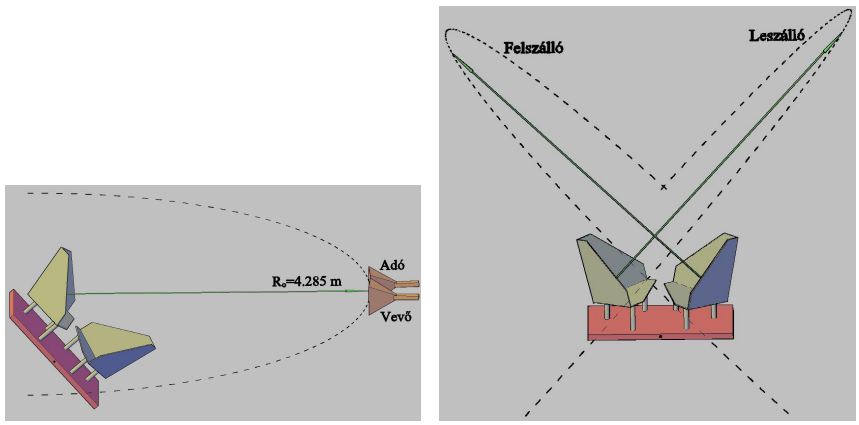
$$n\nabla\times\mathbf{H}_s=\sigma_s\mathbf{E}_s+i\omega_s\varepsilon_s\mathbf{E}_s \tag{A.3.5}$$

Összevetve az (A.3.1), (A.3.4) és az (A.3.2), (A.3.5) egyenleteket és feltételezve, hogy az elektromos és mágneses mezők az egyenletekben meg kell egyezzenek a következő összefüggések írhatók fel az eredeti és skálázott frekvenciákra és anyagi együtthatókra:

$$\frac{\omega_s\mu_s}{n}=\omega\mu \tag{A.3.6}$$

$$\frac{\sigma_s}{n}=\sigma \tag{A.3.7}$$

$$\frac{\omega_s\varepsilon_s}{n}=\omega\varepsilon \tag{A.3.8}$$



A.3.1. ábra. A skálázott reflektormodellek szemben álló geometriában történő mérési elrendezésének sematikus ábrája (Bányai et al. 2019b; Nagy 2020). a) Az adó és vevő antenna és a vizsgált reflektor térbeli viszonya. b) A szimulált felszálló (ascending) és leszálló (descending) műholdpályákat (szaggatott vonal) mutatja be, a reflektorból kiinduló nyilak a maximális RCS irányába mutatnak

Ha a skálázott reflektormodell permittivitása és permeabilitása megegyezik a valós reflektor permittivitásával és permeabilitásával, azaz $\varepsilon_s = \varepsilon$ és $\mu_s = \mu$, akkor $\sigma_s = n\sigma$ és $f_s = nf$, illetve $\omega_s = n\omega$, a skálázott RCS pedig: $A_s = \sigma n^2$. A vezetőképesség skálázása sok esetben nem megoldható, azonban ez nem probléma, mivel a mérések során a vezetőképesség nem egy meghatározó paraméter.

A.3.3 Mérési elrendezés

Az IB modell egy betonalapzatból és egy-egy alumíniumból készült háromoldalú reflektor párból és a reflektorokhoz tartozó alumínium lábból áll, ezen alkotóelemek anyagi jellemzőit kell meghatározni, hogy a modell reflektort megfelelően tudjuk skálázni.

A skálázott modell RCS meghatározásánál alkalmazott frekvencia 27 GHz volt, amiből számítható a skálázási faktor: $n = \frac{f_s}{f} = \frac{27}{5.405} = 4.99537 \approx 5$. A modell reflektor mérete 5-ször kisebb kell legyen és a vezetőképessége 5-ször nagyobb kell legyen, a valós reflektorhoz képest. Az alumínium vezetőképessége 3.5×10^7 S/m, a legjobb vezetőképességgel rendelkező könnyen beszerezhető anyag, az ezüst, vezetőképessége azonban csak 6.30×10^7 S/m, így csak 1.8-szoros vezetőképesség növekedés érhető el a modell reflektor esetén.

A betonhoz az anyagi jellemzők (relatív permittivitás: $\varepsilon_r = 4.5 - 5.5$) szempontjából legjobban hasonlító két anyag:

- FR4 (üvegszálakkal megerősített epoxy-gyanta): $\varepsilon_r = 4.3$,
- pyrex üveg: $\varepsilon_r = 4.6$,

a kétfajta anyag közül bármelyik alkalmazható a skálázott modell alapzatának elkészítésére.

A mérés során a reflektorpár modellek RCS karakterisztikája kerül meghatározásra az azimut szög függvényében. Összesen négy reflektortípus vizsgálata történt meg kürt antennák felhasználásával (egy adó és egy vevő). A mérési elrendezést sematikusan az A.3.1a. ábra mutatja be.

A terepi telepítés során a reflektorpárok irányzásának kivitelezésénél a reflektort úgy kell irányozni, hogy a sík, mely a maximális visszavert amplitúdót biztosítja, egybeessen a műholdáthaladás irányával. Ezért a kísérleti elrendezés összeállítása során a reflektormodellek viszonyítási rendszeréből a vevő- és adó antennák „áthaladása” közel megegyezett egy virtuális műhold áthaladási irányával felszálló- és leszálló áthaladási síkban. A felszálló- és leszálló antenna „áthaladás” síkjait az A.3.1b ábra szemlélteti.

A kísérlet során regisztrálásra kerül a kibocsájtott jel teljesítménye és visszavert jel vevőantennába

Kísérleti felszerelés	Agilent N5230A VNA (jelforrás) HP8593E spektrum analizátor RFT 02012 antenna forgató egység HP E3631A energiaforrás a forgató egység vezérlésére Dell XPS15z vezérléshez használt PC Agilent 82357B USB-GPIB interfész Antenna állvány, kábelek
Mérési paraméterek	
Mérési frekvencia	$f = 27\,\text{GHz}$
Kibocsátott teljesítmény	$P_T = 7\,\text{dBm}^2$
Mérési alaptávolság	$R_0 = 4.285\,\text{m}$ (a reflektort forgató mechanika tengelye és a kürt antennák között)
Kürt antenna nyeresége	$G_T^{\text{dB}} = G_R^{\text{dB}} = 20.45\,\text{dB}$
A maximális csatolás a két antenna között	$-94.2\,\text{dB}$

A.3.1. táblázat

érkező teljesítménye. A kísérleti adatokból a RCS a radaregyenlet segítségével határozható meg:

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{P_R (4\pi)^3 R^4}{P_T G_T G_R \lambda^2} \tag{A.3.9}$$

ahol,

- σ_{eff} a m^2-ben mért effektív radarkeresztmetszet,
- P_T a mW-ban mért kibocsájtott (transzmittált) teljesítménye
- P_R a mW-ban mért visszavert jel vevő antennánál mért teljesítménye,
- R az antennák és a reflektor közötti távolság,
- λ az elektromágneses hullám hullámhossza,
- G_T az adó antenna nyeresége,
- G_R a vevő antenna nyeresége.

A fenti egyenlet logaritmizált formában:

$$\sigma_{\text{eff}}\ [\text{dBm}^2] = 10 \log \left(\frac{(4\pi)^3 R^4}{\lambda^2} \right) - a_{\text{path}} - G_T^{\text{dB}} - G_R^{\text{dB}} \tag{A.3.10}$$

ahol,

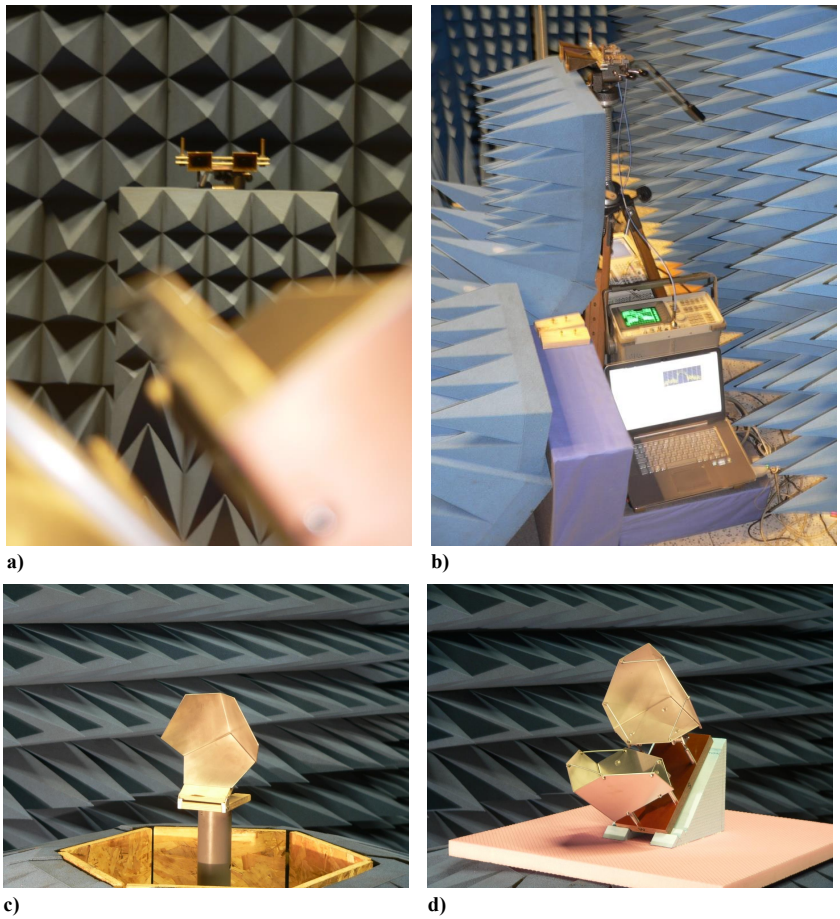
- a_{path} [dB] a dB-ben mért útveszteség,
- $G_T^{\text{dB}} = 10 \log(G_T)$ az adó antenna nyeresége decibelben,
- $G_R^{\text{dB}} = 10 \log(G_R)$ a vevő antenna nyeresége decibelben,

A mérések elvégzéséhez felhasznált eszközöket illetve a mérési paramétereket az A.3.1 táblázat tartalmazza. A mérési elrendezés az A.3.2 ábrán látható. A reflektormodellt egy tartóelemre rögzítve (A.3.2c. ábra) és a tartóelemet egy léptetőmotorral forgatva kivitelezhető a mérés.

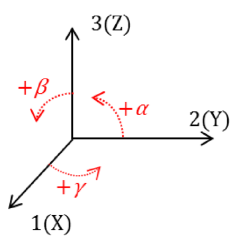
B ISIGN módszer

B.1 Koordinátarendszer elforgatása

Egy adott Descartes-koordináterendszert, egy teljesen általános esetben a három egymástól független szöggel tudunk elforgatni (B.1.1. ábra).
Az elforgatott (e_r, n_r, u_r) és az eredeti koordináták között (e, n, u) egy forgatási mátrix teremti meg



A.3.2. ábra. Az analóg kísérletek során felhasznált eszközök és a kísérleti elrendezések (Bányai et al. 2019b; Nagy 2020). a) A mikrohullám kibocsájtására és a visszavert jel regisztrálására használt kürt antennák a háttérben, a vizsgált reflektorpárral az előtérben. b) A mérés elvégzéséhez használt digitális és analóg eszközök. c) Skálázott hatszögű reflektormodell a reflektorok RCS karakterisztikájának megállapításához használt analóg kísérleti elrendezésben. d) IB modell RCS karakterisztikájának meghatározásának kísérleti elrendezése. Skálázott ötszögű 33%-os relatív csonkolású, pántokkal megerősített reflektorpár szemben álló elrendezésben.



B.1.1. ábra. Egy koordináterendszer elforgatása általános esetben három szög felhasználásával

a kapcsolatot:

$$\begin{bmatrix} e_r \\ n_r \\ u_r \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} e \\ n \\ u \end{bmatrix}, \tag{B.1.1}$$

ahol

$$R = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma & \cos\beta\sin\gamma & -\sin\beta \\ \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma & \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma - \cos\alpha\cos\gamma & \sin\alpha\cos\beta \\ \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma - \sin\alpha\sin\gamma & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \tag{B.1.2}$$

Tegyük fel, hogy több pont koordinátáját megmértük egy topocentrikus koordinátarendszerben két alkalommal. Amennyiben az ismételt mérés esetén a koordináták eltérnek az eredeti mérés során mért koordinátáktól, és a pontok nem egy egyenesen találhatók, meghatározhatók az α, β, γ forgatási szögek, legkisebb négyzetes kiegyenlítéssel.
Az ismételt mérés során kapott koordináták nem lineáris függvényei a forgatási szögeknek; a kiegyenlítés során alkalmazott parciális deriváltak:

$$\begin{bmatrix} \partial e_r \\ \partial n_r \\ \partial u_r \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \partial\alpha \\ \partial\beta \\ \partial\gamma \end{bmatrix}, \tag{B.1.3}$$

ahol

$$A = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, \tag{B.1.4}$$

$$\begin{aligned}
a_{12} &= -e\sin\beta\cos\gamma - n\sin\beta\sin\gamma - u\cos\beta \\
a_{13} &= -e\cos\beta\cos\gamma + n\cos\beta\cos\gamma \\
a_{21} &= e(\cos\alpha\sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma) + n(\cos\alpha\sin\beta\cos\gamma - \sin\alpha\cos\gamma) + u\cos\alpha\cos\beta \\
a_{22} &= e\sin\alpha\cos\beta\cos\gamma + n\sin\alpha\cos\beta\cos\gamma - u\sin\alpha\sin\beta \\
a_{23} &= -e(\sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma) + n(\sin\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma) \\
a_{31} &= -e(\sin\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma) - n(\sin\alpha\sin\beta\sin\gamma - \cos\alpha\cos\gamma) - u\sin\alpha\cos\beta \\
a_{32} &= e\cos\alpha\cos\beta\cos\gamma + n\cos\alpha\cos\beta\sin\gamma - u\cos\alpha\sin\beta \\
a_{33} &= -e(\cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\gamma) + n(\cos\alpha\sin\beta\cos\gamma - \sin\alpha\sin\gamma).
\end{aligned}$$

Hivatkozások

About Us - Geo-Sentinel (2022). [Utolsó látogatás időpontja 2023.08.11.] url: `https://geo-sentinel.eu/about-us`.

Laurencelle J (n.d.): ALOS PALSAR - About. In: (). url: `https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/alos-palsar-about`.

Bagnardi M, **Hooper A** (July 2018): Inversion of Surface Deformation Data for Rapid Estimates of Source Parameters and Uncertainties: A Bayesian Approach. In: Geochem. Geophys. Geosyst. 19.7, pp. 2194–2211. issn: 1525-2027. doi: `10.1029/2018GC007585`.

Balajti I, **Hajdú F** (Sept. 2016): Surprising findings from the Hungarian radar developments in the era of the Second World War. In: 358. URSI, pp. 82–108. doi: `10.23919/URSIRSB.2016.7909883`.

Bányai L, **Szűcs E**, **Wesztergom V** (Sept. 2017): Geometric features of LOS data derived by SAR PSI technologies and the three-dimensional data fusion. In: Acta Geodaetica et Geophysica 52.3, pp. 421–436. issn: 2213-5820. doi: `10.1007/s40328-016-0183-3`.

Bányai L, **Bozsó I**, **Szűcs E**, **Gribovszki K**, **Wesztergom V** (2023): Monitoring Strategy of Geological Hazards Using Integrated Three-dimensional InSAR and GNSS Technologies with Case Study. In: Periodica Polytechnica Civil Engineering. doi: `10.3311/PPci.20009`. url: `https://pp.bme.hu/ci/article/view/20009`.

Bányai L, **Mentes G**, **Újvári G**, **Miklós K**, **Czap Z**, **Gribovszki K**, **Papp G** (Apr. 2014): Recurrent landsliding of a high bank at Dunaszekcső, Hungary: Geodetic deformation monitoring and finite element modeling. In: Geomorphology 210, pp. 1–13. issn: 0169-555X. doi: 10.1016/j.geomorph.2013.11.032.

Bányai L, **Nagy L**, **Bozsó I**, **Szűcs E**, **Wesztergom V** (2018): Műholdradar-interferometriás alkalmazások fejlesztése a tektonikus folyamatok megfigyelésében. In: Magyar Geofizika 59.1, pp. 18–30.

Bányai L, **Nagy L**, **Hooper A**, **Bozsó I**, **Szűcs E**, **Wesztergom V** (2019a): Investigation of Integrated Twin Corner Reflectors Designed for 3-D InSAR Applications. In: IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 17.6, pp. 1013–1016. doi: 10.1109/LGRS.2019.2939675.

Bányai L, **Szűcs E**, **Bozsó I**, **Hooper A**, **Nagy L**, **Szabó J**, **Wesztergom V** (2019b): Technical Data Package; ESA Contract No.: Integrated Sentinel-PSI and GNSS technical facilities and procedures for the determination of 3D surface deformations caused by environmental processes. Tech. rep. Geodetic and Geophysical Institute, MTA CSFK Hungary; COMET School of Earth and Environment, University of Leeds, UK; Department of Broadband Infocommunications and Electromagnetic Theory, BME HVT, Hungary. url: https://epss.hu/~banyai/ESA_closing/Tecnical_Data_Package.pdf.

Bekaert D, **Walters RJ**, **Wright TJ**, **Hooper AJ**, **Parker DJ** (Dec. 2015): Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques. In: Remote Sens. Environ. 170, pp. 40–47. issn: 0034-4257. doi: 10.1016/j.rse.2015.08.035.

Berardino P, **Fornaro G**, **Lanari R**, **Sansosti E** (Nov. 2002): A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 40.11, pp. 2375–2383. issn: 0196-2892. doi: 10.1109/TGRS.2002.803792.

Bozsó I, **Bányai L**, **Hooper A**, **Szűcs E**, **Wesztergom V** (Apr. 2020): Integration of Sentinel-1 Interferometry and GNSS Networks for Derivation of 3-D Surface Changes. In: IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 18.4, pp. 692–696. issn: 1558-0571. doi: 10.1109/LGRS.2020.2984917.

Brown L (1999): Technical and military imperatives: a radar history of World War 2. Crc Press.

Bürgmann R, **Rosen PA**, **Fielding EJ** (Nov. 2000): Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation. In: Annual Review of Earth and Planetary Sciences 28.1, pp. 169–209. issn: 1545-4495. doi: 10.1146/annurev.earth.28.1.169.

Chen C, **Zebker A** (2003): SNAPHU: statistical-cost, network-flow algorithm for phase unwrapping. In: Retrieved April 27, p. 2016.

Cherneyak VS, **Immoreev IY**, **Vovshin BM** (Dec. 2003): Radar in the Soviet Union and Russia: a brief historical outline. In: IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag. 18.12, pp. 8–12. issn: 1557-959X. doi: 10.1109/MAES.2003.1259019.

Copernicus Homepage (n.d.). [Utolsó látogatás időpontja 2023.05.05.] url: https://www.copernicus.eu/en.

Curlander JC, **McDonough RN** (1991): Synthetic aperture radar. Vol. 11. Wiley, New York.

Deák G, **Mihai S**, **Deák ŞE**, **Oancea I** (Dec. 2007): Addressing the Risk of Surface Water Intrusion in Old Romanian Salt Mines. In: Mine Water Environ. 26.4, pp. 251–255. issn: 1616-1068. doi: 10.1007/s10230-007-0011-7.

Egri G, **Párdányi J** (1968): Dunaújvárosi magaspartok állékonyság vizsgálata (Stability investigations of the high banks at Dunaújváros). In: Műszaki Tervezés 7, pp. 19–24.

Fattahi H, **Agram P**, **Simons M** (Oct. 2016): A Network-Based Enhanced Spectral Diversity Approach for TOPS Time-Series Analysis. In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 55.2, pp. 777–786. issn: 1558-0644. doi: 10.1109/TGRS.2016.2614925.

Ferretti A, **Prati C**, **Rocca F** (July 2000): Analysis of Permanent Scatterers in SAR interferometry. In: IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No.00CH37120). Vol. 2. IEEE, 761–763vol.2. isbn: 978-0-7803-6359. doi: 10.1109/IGARSS.2000.861695.

— (Jan. 2001): Permanent scatterers in SAR interferometry. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39.1, pp. 8–20. issn: 1558-0644. doi: 10.1109/36.898661.

Ferretti A (2014): Satellite InSAR Data: reservoir monitoring from space (EET 9). Earthdoc.

Ferretti A, **Savio G**, **Barzaghi R**, **Borghi A**, **Musazzi S**, **Novali F**, **Prati C**, **Rocca F** (Apr. 2007): Submillimeter Accuracy of InSAR Time Series: Experimental Validation. In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 45.5, pp. 1142–1153. issn: 1558-0644. doi: 10.1109/TGRS.2007.894440.

Freeman A (Nov. 1992): SAR calibration: an overview. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 30.6, pp. 1107–1121. issn: 1558-0644. doi: 10.1109/36.193786.

Galati G, **Genderen P van** (Sept. 2016): Introduction to the special section on some less-well-known contributions to the development of radar: From its early conception until just after the Second World War. In: URSI Radio Science Bulletin 2016.358, pp. 12–17. issn: 1024-4530. doi: 10.23919/URSIRSB.2016.7909879.

Garthwaite M, **Nancarrow S**, **Hislop A**, **Thankappan A**, **Dawson J**, **Lawrie S** (2015): The Design of Radar Corner Reflectors for the Australian Geophysical Observing System; Geoscience Australia: Canberra, Australia.

Hanssen RF (2001): Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Vol. 2. Remote Sensing and Digital Image Processing. Springer Netherlands. isbn: 9780792369455. url: https://books.google.hu/books?id=bqNkJUk4wtMC.

Hooper A (2006): Persistent Scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation. PhD thesis. Stanford University.

Hooper A, **Bekaert D**, **Spaans K**, **Arıkan M** (Jan. 2012): Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. In: Tectonophysics 514-517, pp. 1–13. issn: 0040-1951. doi: 10.1016/j.tecto.2011.10.013.

Hooper A, **Spaans K**, **Bekaert D**, **Cuenca MC**, **Arıkan M**, **Oyen A** (2010): StaMPS/MTI manual. In: Delft Institute of Earth Observation and Space Systems Delft University of Technology, Kluyverweg 1, p. 2629.

Hopfield HS (Aug. 1969): Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. In: J. Geophys. Res. 74.18, pp. 4487–4499. issn: 0148-0227. doi: 10.1029/JC074i018p04487.

Jarvis A, **Guevara E**, **Reuter HI**, **Nelson AD** (2008): Hole-filled SRTM for the globe : version 4 : data grid. In: University of Twente Research Information. url: https://research.utwente.nl/en/publications/hole-filled-srtm-for-the-globe-version-4-data-grid.

Kalman RE (Mar. 1960): A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. In: J. Basic Eng. 82.1, pp. 35–45. issn: 0021-9223. doi: 10.1115/1.3662552.

KGO (2023). [Utolsó látogatás időpontja 2023.08.11.] url: https://www.sgo-penc.hu/muholdradar.php.

Király C, **Cseresznyés D**, **Magyar N**, **Hatvani IG**, **Egedy T**, **Szabó-Krausz Z**, **Udvardi B**, **Jakab G**, **Varga G**, **Szalai Z** (Apr. 2023): The Role of Water and Weathering Processes in Landslides in Hungarian Loess Sediments. In: Hydrology 10.4, p. 81. issn: 2306-5338. doi: 10.3390/hydrology10040081.

Krézsek C, **Bally AW** (May 2006): The Transylvanian Basin (Romania) and its relation to the Carpathian fold and thrust belt: Insights in gravitational salt tectonics. In: Mar. Pet. Geol. 23.4, pp. 405–442. issn: 0264-8172. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2006.03.003.

Li Y, **Martinis S**, **Wieland M**, **Schlaffer S**, **Natsuaki R** (Sept. 2019): Urban Flood Mapping Using SAR Intensity and Interferometric Coherence via Bayesian Network Fusion. In: Remote Sens. 11.19, p. 2231. issn: 2072-4292. doi: 10.3390/rs11192231.

Li Z, **Bethel J, et al.** (2008): Image coregistration in SAR interferometry. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 37, pp. 433–438.

Li Z, **Fielding EJ**, **Cross P**, **Preusker R** (July 2009): Advanced InSAR atmospheric correction: MERIS/MODIS combination and stacked water vapour models. In: Int. J. Remote Sens. 30.13, pp. 3343–3363. issn: 0143-1161. doi: 10.1080/01431160802562172.

Li Z, **Muller J.-P**, **Cross P**, **Fielding EJ** (Mar. 2005): Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) atmospheric correction: GPS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), and InSAR integration. In: J. Geophys. Res. Solid Earth 110.B3. issn: 0148-0227. doi: 10.1029/2004JB003446.

Magyar B, **Horváth R**, **Völgyesi L** (2021): Regional Scale Monitoring of Surface Deformation in Transcarpathia Using Insar Technology. In: Scientific Bulletin Series D: Mining, Mineral Processing, Non-Ferrous Metallurgy, Geology & Environmental Engineering 35.2.

The MathWorks Inc. (2022): MATLAB version: 9.13.0 (R2022b). [Online; Utolsó látogatás időpontja 2023.05.05.] Natick, Massachusetts, United States. url: https://www.mathworks.com.

Mentes G, **Bányai L**, **Újvári G**, **Papp G**, **Gribovszki K**, **Bódis VB** (Nov. 2012): Recurring mass movements on the Danube's bank at Dunaszekcső (Hungary) observed by geodetic methods. In: Journal of Applied Geodesy 6.3-4, pp. 203–208. issn: 1862-9024. doi: 10.1515/jag-2012-0011.

Móga J, **Gönczi S**, **Berghauer S**, **Móga K** (2019): Georesource or geohazard. In: Past, present and future of the salt mines in Solotvyno, GeoMetodika 3, pp. 5–19.

Móga J, **Lippman L**, **Tombor E**, **Fehér K**, **Kéri A**, **Borsodi A** (2015): Az Aknaszlatinai-sókarszt felszínalaktani vizsgálata - Geomorphological Investigation of the Aknaszlatina Saltkarst (Ukrajna). In: KARST DEVELOPMENT/KARSZTFEJLŐDÉS 20, pp. 185–213.

Nagy L (2020): Tudományos együttműködési beszámoló (nem publikált). Tech. rep. 1111 Budapest, Egry József utca 18, V1 épület: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék.

Neeck SP, **Magner TJ**, **Paules GE** (Jan. 2005): NASA's small satellite missions for Earth observation. In: Acta Astronaut. 56.1, pp. 187–192. issn: 0094-5765. doi: 10.1016/j.actaastro.2004.09.034.

OKADA: Surface deformation due to a finite rectangular source (n.d.). [Utolsó látogatás időpontja 2023.08.28.] url: https://github.com/IPGP/deformation-lib/tree/master/okada.

Okada Y (Apr. 1992): Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. In: Bull. Seismol. Soc. Am. 82.2, pp. 1018–1040. issn: 0037-1106. doi: 10.1785/BSSA0820021018.

Pécsi M, **Schweitzer F**, **Scheuer G** (1979): ENGINEERING GEOLOGICAL AND GEOMORPHOLOGICAL INVESTIGATION OF LANDSLIDES IN THE LOESS BLUFFS ALONG THE DANUBE IN THE GREAT HUNGARIAN PLAIN. [Online; accessed 4. May 2023]. url: https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCALGEODEBRGM8120491208.

Petrik O (2007): Mikrohullámú távérzékelt adatok integrálása a felszínvizsgálatokba. PhD thesis. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földtudományi Doktori Iskola.

POD Products and Requirements - Ground Segment - Sentinel Online - Sentinel Online (n.d.). [Utolsó látogatás időpontja 2023.07.28.] url: https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/pod/products-requirements.

Robillard WG, **Wilson DA**, **Brown CM**, **Eldridge W** (2011): Evidence and Procedures for Boundary Location. Chichester, England, UK: Wiley. isbn: 978-0-47090160-1. url: https://books.google.hu/books?id=n-4eWtgEXjoC&pg=PT282&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.

Ronczyk L, **Zelenka-Hegyi A**, **Török G**, **Orbán Z**, **Defilippi M**, **Kovács IP**, **Kovács DM**, **Burai P**, **Pasquali P** (July 2022): Nationwide, Operational Sentinel-1 Based InSAR Monitoring System in the Cloud for Strategic Water Facilities in Hungary. In: Remote Sens. 14.14, p. 3251. issn: 2072-4292. doi: 10.3390/rs14143251.

Saastamoinen J (Jan. 1972): Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites. In: AGU Journals, pp. 247–251. doi: 10.1029/GM015p0247.

Sarabandi K, **Chiu T.-C** (Oct. 1996): Optimum corner reflectors for calibration of imaging radars. In: IEEE Transactions on antennas and Propagation 44.10, pp. 1348–1361. issn: 1558-2221. doi: 10.1109/8.537329.

Savio G, **Ferretti A**, **Novali F**, **Musazzi S**, **Prati C**, **Rocca F** (2006): PSInSAR validation by means of a blind experiment using dihedral reflectors. In: FRINGE 2005 workshop. Vol. 610.

SciHub Homepage (n.d.). [Utolsó látogatás időpontja 2023.05.05.] url: https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home.

Segall P (Jan. 2010): Earthquake and Volcano Deformation. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press. isbn: 978-1-40083385-6. doi: 10.1515/9781400833856.

SAR Instrument - Sentinel-1 SAR Technical Guide - Sentinel Online - Sentinel Online (n.d.). [Utolsó látogatás időpontja 2023.05.05.] url: https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/sar-instrument.

Sentinel-1- Observation Scenario - Planned Acquisitions - ESA - Sentinel Online (n.d.). [Utolsó látogatás időpontja 2023.05.05.] url: https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/observation-scenario.

User Guides - Sentinel-1 SAR - Acquisition Modes - Sentinel Online - Sentinel Online (n.d.). [Utolsó látogatás időpontja 2023.05.05.] url: https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes.

Shankland RS (Jan. 1964): Michelson-Morley Experiment. In: Am. J. Phys. 32.1, pp. 16–35. issn: 0002-9505. doi: 10.1119/1.1970063.

Ship Monitoring from Space: SUEZ (n.d.). [Utolsó látogatás időpontja 2023.05.05.] url: https://geovisualization.net/2022/07/12/ship-monitoring-from-space-suez.

Skolnik M (Mar. 2002): Role of radar in microwaves. In: IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 50.3, pp. 625–632. issn: 1557-9670. doi: 10.1109/22.989947.

Small D (Apr. 2011): Flattening Gamma: Radiometric Terrain Correction for SAR Imagery. In: IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 49.8, pp. 3081–3093. issn: 1558-0644. doi: 10.1109/TGRS.2011.2120616.

Szabó J (Apr. 2003): The relationship between landslide activity and weather: examples from Hungary. In: Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 3.1/2, pp. 43–52. issn: 1561-8633. doi: 10.5194/nhess-3-43-2003.

Szűcs E, **Gönczy S**, **Bozsó I**, **Bányai L**, **Szakacs A**, **Szárnya C**, **Wesztergom V** (Mar. 2021): Evolution of surface deformation related to salt-extraction-caused sinkholes in Solotvyno (Ukraine) revealed by Sentinel-1 radar interferometry. In: Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 21.3, pp. 977–993. issn: 1561-8633. doi: 10.5194/nhess-21-977-2021.

Kramer HJ (n.d.): TSX (TerraSAR-X). In: (). [Online; Utolsó látogatás időpontja 2023.05.05.] url: https://www.eoportal.org/satellite-missions/terrasar-x#sensor-complement.

Tralli DM, **Lichten SM** (June 1990): Stochastic estimation of tropospheric path delays in global positioning system geodetic measurements. In: Bull. Géodésique. 64.2, pp. 127–159. issn: 1432-1394. doi: 10.1007/BF02520642.

Udvardi B, **Kovács IJ**, **Szabó C**, **Falus G**, **Újvári G**, **Besnyi A**, **Bertalan É**, **Budai F**, **Horváth Z** (Oct. 2016): Origin and weathering of landslide material in a loess area: a geochemical study of the Kulcs landslide, Hungary. In: Environ. Earth Sci. 75.19, pp. 1–19. issn: 1866-6299. doi: 10.1007/s12665-016-6103-6.

Újvari G, **Mentes G**, **Bányai L**, **Kraft J**, **Gyimóthy A**, **Kovács J** (2009): Evolution of a bank failure along the River Danube at Dunaszekcs □o, Hungary. In: Geomorphology 109.3-4, pp. 197–209. issn: 0169555X. doi: 10.1016/j.geomorph.2009.03.002. url: http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.03.002.

Vaughan WW, **Johnson DL** (Dec. 1994): Meteorological Satellites—The Very Early Years, Prior to Launch of TIROS-1. In: Bull. Am. Meteorol. Soc. 75.12, pp. 2295–2302. issn: 0003-0007. doi: 10.1175/1520-0477(1994)075<2295:MSVEYP>2.0.CO;2.

Wegmüller U, **Werner C**, **Wiesmann A**, **Strozzi T**, **Kourkouli P**, **Frey O** (July 2016a): Time-series analysis of Sentinel-1 interferometric wide swath data: Techniques and challenges. In: 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). IEEE, pp. 3898–3901. doi: 10.1109/IGARSS.2016.7730012.

Wegmüller U, **Werner C**, **Frey O**, **Magnard C**, **Strozzi T** (Jan. 2018): Reformulating the Split-Spectrum Method to Facilitate the Estimation and Compensation of the Ionospheric Phase in SAR Interferograms. In: Procedia Comput. Sci. 138, pp. 318–325. issn: 1877-0509. doi: 10.1016/j.procs.2018.10.045.

Wegmüller U, **Werner C**, **Strozzi T**, **Wiesmann A**, **Frey O**, **Santoro M** (Jan. 2016b): Sentinel-1 Support in the GAMMA Software. In: Procedia Comput. Sci. 100, pp. 1305–1312. issn: 1877-0509. doi: 10.1016/j.procs.2016.09.246.

Werner C, **Wegmuller U**, **Strozzi T**, **Wiesmann A** (July 2003): Interferometric point target analysis for deformation mapping. In: IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477). Vol. 7. IEEE, 4362–4364vol.7. isbn: 978-0-7803-7929. doi: 10.1109/IGARSS.2003.1295516.

Werner C, **Wegmüller U**, **Strozzi T**, **Wiesmann A** (2000): Gamma SAR and interferometric processing software. In: Proceedings of the ERS-Envisat symposium, Gothenburg, Sweden. Vol. 1620. Citeseer, p. 1620.

Xu L, **Zhang H**, **Wang C**, **Zhang B**, **Liu M** (Dec. 2018): Crop Classification Based on Temporal Information Using Sentinel-1 SAR Time-Series Data. In: Remote Sens. 11.1, p. 53. issn: 2072-4292. doi: 10.3390/rs11010053.

Yanjie Z, **Prinet V** (Sept. 2004): InSAR coherence estimation. In: IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Vol. 5. IEEE, 3353–3355vol.5. isbn: 978-0-7803-8742. doi: 10.1109/IGARSS.2004.1370422.

Zebker HA, **Goldstein RM** (1986): Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. In: Journal of Geophysical Research: Solid Earth 91.B5, pp. 4993–4999. issn: 2156-2202. doi: 10.1029/JB091iB05p04993. url: http://dx.doi.org/10.1029/JB091iB05p04993.

Zink M, **Kietzmann H** (1995): Next Generation SAR - External Calibration. Tech. rep. LIDO-Berichtsjahr=1995, Institut für Hochfrequenztechnik. url: https://elib.dlr.de/33370.

Zoltán L, **Friedl Z**, **Pacskó V**, **Orbán I**, **Tanács E**, **Magyar B**, **Kristóf D**, **Standovár T** (Jan. 2021): Application of Sentinel-1 radar data for mapping ice disturbance in a forested area. In: European Journal of Remote Sensing 54.1, pp. 569–588. doi: 10.1080/22797254.2021.1982407.

Zuo C, **Huang L**, **Zhang M**, **Chen Q**, **Asundi A** (Oct. 2016): Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: A comparative review. In: Opt. Lasers Eng. 85, pp. 84–103. issn: 0143-8166. doi: 10.1016/j.optlaseng.2016.04.022.