

# A kozmikus geodézia alkalmazásának mérföldkövei és eredményei

Mihály Szabolcs

## 1. Bevezetés

A kozmikus geodézia módszere és eszközei mára polgárjogot nyertek az élet minden területén. Hogy milyen mérföldköveken keresztül jutottunk el ebbe, a ma már természetesnek vett helyzetbe, azt hazai és nemzetközi eredményekkel és néhány gyakorlati példával mutatom be.

Azok közé tartozom, akik Magyarországon a műhold-megfigyelések kezdeti lépéseit a Bajai Observatóriumban Ill Márton segítségével tanulhattuk meg. Ezt az érdekes munkát 1967-ben a Kartográfiai Vállalat mérnökeként kezdhettem el Baján. Igaz, hogy ezt átmenetileg megszakította a Pulkovói Observatóriumban tartott műhold-megfigyelési tanfolyam és a Potsdam-Szófia kozmikus geodéziai célú földi poligon hossz mérési munkáiban való részvételem, de 1969-ben visszatértem Bajára. A BGTV mérnökeként a műholdak geodéziai célú megfigyelésével és hasznosításuk tanulmányozásával bíztak meg. A FÖMI-ben 1970-től, 19 évig – ebből 1974-től a FÖMI Kozmikus Geodéziai Observatóriumában (KGO) – végeztem fejlesztési feladatokat és azokhoz kapcsolódóan folytattam nemzetközi tevékenységet. A FÖMI tudományos igazgatóhelyetteseként 1989-től és főigazgatójaként 1997-től 2010-ig voltam cselekvő részese a műholdgeodézia hazai, eredményes alkalmazásának.

A Bajai Observatóriumban a kozmikus geodézia hazai alkalmazásának bölcsője. Az ott szerzett tapasztalatok sokat jelentettek nekem és munkatársaimnak, számos eredményt tudhatunk magunkénak itthon és a nemzetközi szinten.

A fentiek szolgáltak motivációként a 2016. szeptember 3-án Baján rendezett Ill Márton Emlékülés alkalmával megtartott előadásomhoz [1]. Ez az előadás jelen cikkem alapja.

## 2. Nevezetes űrkutatási és intézményi események

A kozmikus geodézia nemzetközi és hazai alakulását befolyásoló tényezők és állomások:

1929: K. E. Ciolkovszkij közzétette a többlépcsős rakétákra vonatkozó, a későbbi űrrakéták által alkalmazott elméletet. K. E. Ciolkovszkij a rakéta-elmélet megalapozója.

1946: Sikeres Föld–Hold radarkísérletet végzett J. H. DeWitt és G. Valley New Jersey-ben január 10-én és tőlük függetlenül Bay Zoltán és csoportja Budapesten február 6-án.

1949: A Finn Geodéziai Intézet gyakorlatban alkalmazta az Yrjö Väisälä által 1946-ban kidolgozott stelláris háromszögelést. Geometriája a szatellita geodéziai háromszögelés alapja.

1957: Felbocsátották a Szputnyik-1 műholdat. Utána hamarosan kb. 300 műholdkövető állomás működött világszerte. Amerikai kutatók Doppler-csúszásokból számították ki a pályát.

1958: Az MTA Csillagvizsgáló Intézet irányítása alatt Almár Iván szervezésében Baján, Budapesten, Miskolcon és Szombathelyen elkezdődtek az optikai műholdmegfigyelések.

1962: Az USA Haditengerészete felbocsátotta az ANNA 1B nevű első geodéziai célú műholdat.

1964: Az impulzusüzemű földi pont-műhold lézeres távolságmérések kezdete. Ekkor bocsátották pályára a lézertükrökkel ellátott BE-B (Beacon Explorer 27) műholdat.

1964: Az amerikaiak katonai használatra bevezették az NNSS elnevezésű doppleres műholdas navigációs rendszert. 1967-től polgári használatba került, és a geodézia korszakváltó eszközévé vált.

1965: Bay Zoltán a méter új definíciójaként a hossz mérés egységét az időmérésre vezette vissza. Ajánlását 1983-ban elfogadták az SI-mértérendszer alapjaként.

1966: A Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO) közzé tette a műholdmegfigyelések alapján levezett Standard Earth 1966 nevű első globális földmodelljét.

1967: Magyarország belépett a Szovjetunió által koordinált Interkozmosz együttműködésbe, és megalakította az Űrkutatási Kormánybizottságot.

1967: Joó Istvánnak, az Országos Földmérési és Térképészeti Hivatal (OFTH) műszaki vezetőjének a terve és lobbitevékenysége alapján előkészített magyar kezdeményezés hatására a Szocialista Országok Geodéziai Szolgálatai (SzOGSz) tanácskozása javaslatot fogalmazott meg: közös feladataik ellátására a tagországok létesítsenek geodéziai műholdmegfigyelő állomásokat.

1968: A SzOGSz által megfogalmazott javaslat nyomán – a civil és a katonai térképészet összehangolt előterjesztésére – a Minisztertanács Honvédelmi Bizottsága döntött egy geodéziai műholdmegfigyelő magyar komplexum létrehozásáról és ehhez a költségek biztosításáról.

1969: A fenti előkészítések után és az OFTH felterjesztésére az agrárminisztérium (MÉM) polgári célú műholdmegfigyelő observatórium létrehozásáról döntött, Penc határában.

1969–73: Worldwide Satellite Triangulation Network elnevezésű világméretű szatellita-geodéziai hálózati mérési program valósult meg az USA nemzeti programja támogatásával.

1969: Az amerikai McDonald Observatóriumban ekkor kezdődtek el a Holdra irányuló lézeres távolságmérések.

1972: Bevezették a WGS72 (World Geodetic System 1972, USA) elnevezésű geodéziai világrendszer, amely egy ideig az NNSS doppleres munkák vonatkoztatási kerete volt.

1976: Felbocsátották a LAGEOS-1 prizmarefektorokat hordozó műholdat,

amellyel a lézeres műholdmegfigyelések korszaka, valós gyakorlata kezdődött el.

1984: Bevezették az amerikai WGS84 jelű geodéziai világrendszert, amely a GPS-korszak világszerte használt vonatkoztatási keretként szolgál.

1987: Megalakították az európai geodéziai vonatkoztatási rendszerek IAG EUREF albizottságát.

1988–89: Az újkori nemzetközi égi és földi, valamint az európai földi vonatkoztatási rendszerek használatának kezdete.

1995: Az amerikai GPS (globális helymeghatározó rendszer) teljeskörű működőképességének éve, szakterületünk új korszakának kezdete.

1994–2003: A globális szinten, cm-nél pontosabb megoldások kialakításának éve. Ez az időszak a kozmikus geodézia korábbi munkáinak következménye, eredménye és a jövőben elérendő további eredmények alapja és új eszköze.

### 3. Kozmikus geodéziai mérések és rendszerek

#### 3.1. Feladatok és hasznosítási területek

– Műholdak, űreszközök vizuális, optikai és rádiós követése, elvesztésük megakadályozása;

- Műholdak, űreszközök helyzeti és pályameghatározása űrkutatási és űripári hasznosításra;
- Közeli és távoli űreszközök nyomon követése, pályameghatározása, vezérlésük támogatása;
- A felső légkör kutatása, paramétereinek modellezése (pl.: légsűrűség, hőmérséklet, nyomás);
- A Föld alakjának, nehézségi erőterének és azok változásainak meghatározása, pontosítása;
- Az árapályjelenség, szilárd föld, rugalmassági tényezők meghatározása, változáskövetése;
- Tengerfelszín magasságának meghatározása műholdas altimetriai mérésekkel;
- A Föld forgási vektorának meghatározása és pontosítása, változásainak monitorozása;
- Bolygók és más égitestek nehézségi erőterének, alakjának, forgási adatainak monitorozása;
- Időszolgálat ellátása, atomórák szinkronizálása, idő- és frekvenciaátvitel időlaborok között;
- Térbeli és időbeli vonatkoztatási rendszerek és geodéziai dátumok definiálása, valamint azok fizikai megvalósítását biztosító, állandósított földi pontok koordinátáinak meghatározása és koordinátaváltozásuk nyomon követése, földi és űrbéli keretrendszereik fenntartása;

- Globális és regionális műholdas helymeghatározó rendszerek működtetése, űrszegmentek, földi vezérlő és földi/űrbéli felhasználói szegmentek rendszerbe iktatott fenntartása;
- Pontok térbeli helyzetének és vonatkozási időpontjának meghatározása a föld felszínén, alatt, felett és az űrben;
- Térképészeti felmérések;
- Precíziós navigáció;
- Helyfüggő információk használatához térbeli és időbeli vonatkoztatási rendszer fenntartása;
- Vonatkozó témákban elméletek és modellek kidolgozása, vizsgálata, igazolása vagy cáfolása;
- Távérzékelési mesterséges holdak pálya- és helyzetadatainak biztosítása;
- Katonai célú hasznosítások vízen, földön és a levegőben;
- További hasznosítások teljes sora: mezőgazdaság, közlekedés, mentés, turizmus stb.
- Természeti katasztrófákat okozó, a Földhöz kapcsolódó folyamatok monitorozása;
- A világban zajló fejlesztések és a természet fenntarthatósága érdekében megfogalmazott célkitűzések támogatása céljából a vonatkozó térbeli események, folyamatok és indikátorok felmérése.

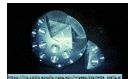
1. táblázat.

Geodézia küldetésű vagy geodéziai célra is használt nevezetes műholdak

Műhold neve:	ANNA-1B	Echo-1 és Echo-2	PAGEOS	Explorer-9	GEOS-A és GEOS-B	GEOS-C
Életciklus	1962, kering	1960-1968, 1964-1969	1966-1975	1961-1964	1965, kering 1968, kering	1975, kering
Méret	0,91 m	d = 30,5 és 41 m	d = 30,5 m	d = 3,7 m	1,1×1,2 m	1,32×0,81 m
Súly	161 kg	?	?	?	175 és 209 kg	341 kg
Perigeum	1081 km	1524 és 1029 km	4207 km	635 km	1121 és 1082 km	817 km
Apogeum	1187 km	1684 és 1316 km	4271 km	2581 km	2282 és 1570 km	848 km
Inklináció	50,1°	47° és 81,5°	87°	38,8°	59,4° és 105,8°	115°
Keringési idő	107,8 perc	118 és 109 perc	181,4 perc	118 perc	120,3 és 112,2 perc	101,6 perc
Cél	Szatellita geodézia	Kommunikáció Felsőléggkörü kutatás Szatellita geodézia	USA Nemzeti Szatellita Geodéziai Program (NSGP)	Felsőléggkörü és exoszféra kutatás	USA Nemzeti Szatellita Geodéziai Program (NSGP)	Geodinamika, altimetria, NSGP, Föld és Óceán Fizikai Program
Fedélzet	Optikai villogó 5×5,6s /10m; Rádiólokáció; Doppleres radar	Ballon holdak 1 magnitudo fényesség	Ballon hold 2 magnitudo fényesség	Alumínium ballon 5,1 cm fehér foltok; 136 MHz beacon követő rendszer	Optikai villogó; Lézeres reflektor; C-sávú, passzív és doppleres radar; SECOR távmérő; Gravitációs stabiliz.	Retroreflector sor; Radar altiméter; Doppler rendszer; S-sávú és C-sávú követő; Szatellita-szatellita követő
Gazda	NASA	NASA	NASA, NOAA NGS	NASA	NASA, NOAA NGS	NASA, NOAA NGS
Forrás	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/ANNA_1B">https://en.wikipedia.org/wiki/ANNA_1B</a>	<a href="https://hu.wikipedia.org/wiki/Echo-1">https://hu.wikipedia.org/wiki/Echo-1</a>	<a href="https://hu.wikipedia.org/wiki/Pageos">https://hu.wikipedia.org/wiki/Pageos</a>	<a href="https://hu.wikipedia.org/wiki/Explore_9">https://hu.wikipedia.org/wiki/Explore_9</a>	<a href="http://www.astronautix.com/geos.html">http://www.astronautix.com/geos.html</a>	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/GEOS-3">https://en.wikipedia.org/wiki/GEOS-3</a>

2. táblázat.

Geodinamikai, gravitációs és földmegfigyelési célú nevezetes műholdak

Műhold neve:	LAGEOS-1	LAGEOS-2	Starlette	Stella	GOCE	GRACE
						
	LAGEOS-1	LAGEOS-2	Starlette és Stella	Precíz lézérágyú mobil állomás	Precíz lézérágyú Matera Observatory	Lézeres távmérés
Életciklus	1976 évtizedes pályák 1992,		1975 évszázados pályák 1993		2009-2013	2002, kering
Méret	60 cm	60 cm	24 cm	24 cm	5,3×2,3 m	Iker műhold
Súly	407 kg	405,4 kg	47,5 kg	48 kg	872 kg	487 kg
Perigeum	5860 km	5620 km	812 km	804 km	254,9 km	483 km
Apogeum	körpálya	körpálya	1114 km	812 km	254,9 km	508 km
Inklináció	109,8°	52,6°	48,83°	98,6°	96,7°	89°
Keringési idő	225 perc	223 perc	104 perc	101 perc	Napszinkron	91 perc
Cél	ILRS; Precíz műholdhelyzet; Földalak meghatározás; Földforgás Szolgálat; Tektonikus lemezmozgás; Kontinensvándorlás; Pontosság: mm, cm		ILRS; Nehézségi erőtér és változásai; Földforgás Szolgálat; Tektonikus lemezmozgás; Kontinensvándorlás; Pontosság: mm, cm		Földi gravitáció és változásai 1 mGal; Geoid, óceánmozgás 1±2 cm; Felbontás 100 m	Nehézségi erőtér; Vízkészletek (jég, tenger, szárazföld); Klímaváltozás; Pontosság mm, cm
Fedélzet	426 db prizma reflektor		60 db prizma reflektor		Elektrosztatikus gravitációs gradiométer (3D gradiens); Műhold-műhold GPS.szel; Lézertűkőr	Precíziós + navigációs GPS; Lézertűkőr; Csillagkövető kamera; Gyorsulásmérő; K-sávú távolság változás mérő (±1 µm)
Földi szegmens	Nagy energiájú lézer impulzus, pontos futásidő-mérő, pontos foton érzékelő, mozgékony teleszkóp, nagyon stabil atomóra, nappali mérés, mobilis lézer. ILRS hálózat				C-sávú pályakövető és ILRS hálózat	
Gazda	USA	USA, Olaszország	Francia Űrügynökség	Francia Űrügynökség	ESA	NASA, JPL, DLR, GFZ
Forrás	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/LAGEOS">https://en.wikipedia.org/wiki/LAGEOS</a>		<a href="https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/">https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/</a>		<a href="http://www.csr.utexas.edu/grace/publications/brochure/page11.html">http://www.csr.utexas.edu/grace/publications/brochure/page11.html</a>	

### 3.2. Mérési technikák és rendszerek

A megfigyelendő objektumok az űrben vannak (űrszegmens), a megfigyelések a földi vagy az űrszegmensből történnek. Az 1. táblázat a geodéziai célra használt műholdak egy csoportját mutatja, a 2. táblázat pedig a geodinamikai célú műholdakat.

#### Az idő mérése

Az idő az űrgeodéziai mérések szerves része. A kozmikus geodéziában kettős szerepe van:

Az egyik az, amikor a mérés megtörténtének időpontját (epochját, vonatkozási időpontját) kell rögzíteni a mindenki által közösen használt UTC (Koordinált Világidő) időskáláján. Példa az időmérés pontosságára: egy műhold méréskori helyzetének számításához 7 km/sec pálya menti sebesség esetén (kb. 1700 km magasságú pálya) egy 1 msec nagyságú időhiba 7 m pálya menti hibának felel meg, 1 µsec időhiba pedig 7 mm értéknek.

Az idő második szerepe abban van, hogy pl. a távolság meghatározása

céljából a fény futási idejét mérik lézeres távmérővel, s a távolságot a futási idő és a fény terjedési sebessége szorzataként számítják. A fény futási idejének mérésében ejtett 1 nanosec ( $10^{-9}$  sec) időhiba a kétutas távolságban 30 cm hibát jelent. 3 cm pontosság érdekében 0,1 nanosec (100 pikosec,  $10^{-10}$  sec) pontosan kell mérni a futási időt. Itt szükség van egyrészt olyan atomórára, amelyik rövid  $1 \div 3$  sec időtartamon belül  $10^{-11}$  sec stabilitással rendelkezik.

#### Órák, szinkronizálásuk és a világidő

A helyi órák közös időkeretbe történő beillesztése időszolgálati rádióadók másodpercjeleivel, vagy valamely bizonyítottan pontosabb órához, nagy pontosságú atom- vagy céziumórához való utaztatással egybekötött szinkronizálással történik. Az utaztatás helyett vagy mellett vezetékes úton, vagy műholdakkal történő összemérési módszert is használnak.

A közös időkeretet, az időskálát az IAT (Nemzetközi Atomidő) képezi, ami kb.

200 atomóra súlyozott átlaga. Az IAT-ból képzik az UTC-t, a Koordinált Világidőt, időnként beiktatva 1 szökőmásodpercet, hogy az UTC a Föld forgását leggyenletesebben mutató UT1 értékkel 1 sec-on belül egyezzen. Az UT1-UTC különbség meghatározásával az IERS elnevezésű, a Föld forgását és vonatkoztatási rendszereket monitorozó nemzetközi szolgálat foglalkozik.

#### Szemelvények mérési rendszerekről és eredményekről

##### Szatellitageodéziai

##### háromszögelési világhálózat

A *Worldwide Satellite Triangulation Network* elnevezésű világhálózat kialakítása 1969–1973 között az USA Nemzeti satelitageodéziai programjának az egyik terméke [2]. Hagyományos földi hálózatokat kapcsolt össze, és globális szintű geocentrikus koordináta-rendszer adott. A világhálózat az 1. ábrán látható. Az USA Geodéziai Szolgálat koordinációjában Hellmut Schmid irányítása és elképzelései szerint valósították meg, 46 földi ponton működő Wild BC-4 nevű





1. ábra. Szatellita geodéziai háromszögelési világhálózat

fotografikus műholdmegfigyelő kamerákkal. A megfigyelt PAGEOS és adatai az 1. táblázatban láthatók. Az észlelések alapján meghatározott topocentrikus műholdirányokból az állomások közötti 3 ÷ 4 ezer km hosszú hurok irányát, s az így nyert háromszögekből és földi alaponalak hossza segítségével a földi

elméleti alapokon és 12 földi állomásról Baker-Nunn kamerákkal végrehajtott fotografikus szinkron-műholdmegfigyelésekből vezették le geometriai és dinamikai módszerek együttes alkalmazásával. Az észlelt műholdak javarészt passzívok voltak (pl. Echo-1, Echo-2,

pontok térbeli helyzetét határozták meg ± 3 ÷ 5 m pontossággal. A geometriai elvet a 2. ábra mutatja.

**Az első műholdas alapú globális földmodell**

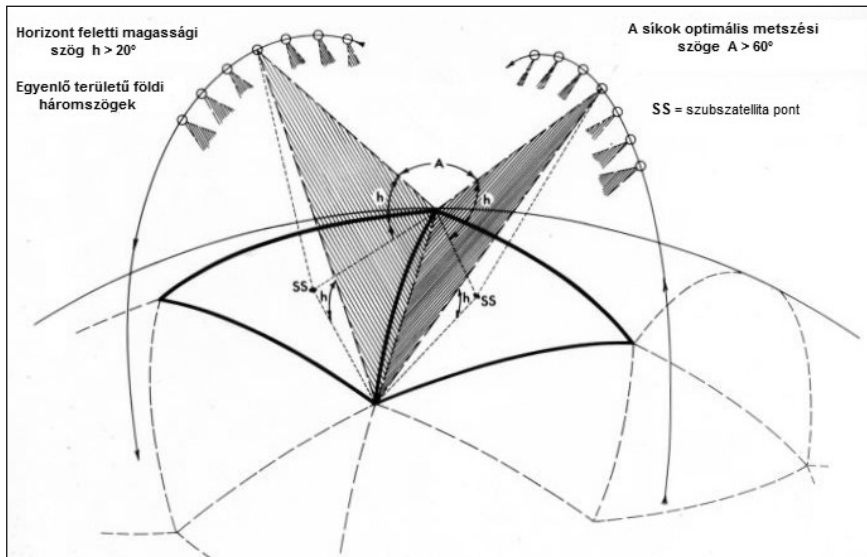
A *Standard Earth* 1966 nevű globális földmodellt az amerikai SAO állította elő [3].

Analitikus Midas-4, Explorer 9), de az aktív, villogó fényeket leadó GEOS-A geodéziai műholdat is használták (1. táblázat). A földi állomások koordinátáit és a nehézségi erőter harmonikusait a 8×8 fokig és rendig határozták meg (néhány magasabb rendű rezonáns harmonikus együtthatóval együtt) geocentrikus koordináta-rendszerben, az 1900-1905 középpólusra és a nemzetközi földforgásszolgálat adatai szerint. A térbeli tájékozást a SAO csillagkatalógus, a méretarányt a gravitációs állandó és a földi tömeg szorzata, a GM értéke adta. Több mint 160 000 észlelést használtak fel, 1680 szimultán irányuk volt 12 műholdra. 28 földi húr irányát határozták meg ±3×10<sup>6</sup> pontossággal. A helyzeti pontosság általában ± 10 ÷ ±20 m.

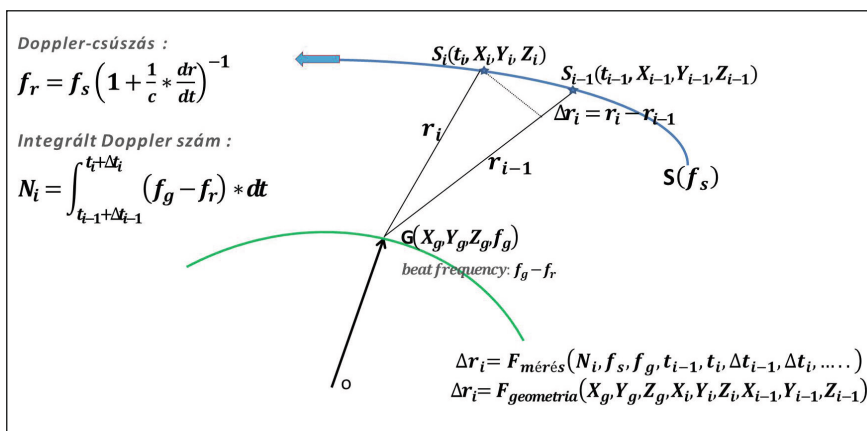
**NNSS doppleres műholdrendszer**

Az NNSS Tengerészeti Navigációs Műholdas Rendszert az amerikai haditengerészetnél 1964-ben vezették be katonai használatra. A Doppler-csúszás elvének alkalmazásával (3. ábra) működő műholdas rendszer (4. ábra) működése 1967-ben teljesedett ki, polgári alkalmazása is ekkor kezdődött [4]. Küldetése 1996-ban befejeződött.

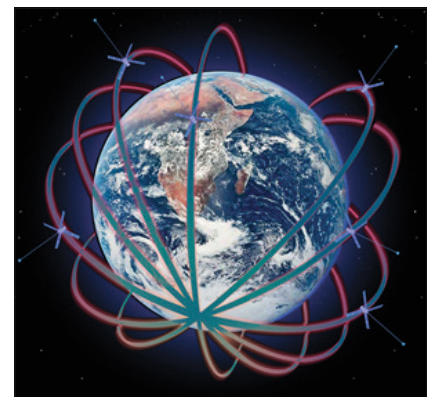
A pályák közel polárisak és kör alakúak, föld feletti magasságuk 1070-1100 km körüli volt, keringési idejük 106-107 perc közötti. Egyszerre legalább tíz műhold keringett pályán. Az ionoszféra hatásának kiejtésére 150 MHz és 400 MHz frekvencián sugároztak. Ez időjeleket és pályaadatokat tartalmazott a WGS72 geodéziai világszisztemben. A földi szegmens az USA



2. ábra. A szatellita-háromszögelés elvi vázlatja



3. ábra. A doppleres műholdas helymeghatározás alapja



4. ábra. Transit navigációs műholdrendszer Navy Navigation Satellite System (NNSS) (kép forrása: Crosslink magazine Spring 2010)

területén négy követő állomásból és irányító központból állt.

Egy műholdátvonulás  $10 \div 20$  perc, amely egy földi pont  $\pm 50 \div 200$  m pontos meghatározását biztosította. Pontosabb navigációhoz több műholdra volt szükség. Többnapos multilokációs észleléssel, a feldolgozási módszertől függően a relatív helymeghatározási pontosság  $\pm 0,3 \div 1$  m.

### Asztrometriai adatok és alapok

Az űrgeodézia szempontjából alapvetően fontos, a vonatkoztatási rendszerek közös térbeli tájékozását biztosító csillagok, távoli égitestek koordinátáiról van szó [5]. A sarkalatos csillagok koordinátáinak FK4 jelű katalógusát 1963-tól alkalmazták. Földi asztrometriai módszerrel készült. Ezt 1988-ban felváltotta a műhold-geodéziában közismert FK5 jelű katalógus. 2000-ben bevezették az FK6 katalógust, amely a Hipparcosnak köszönhetően új, a korábbiaknál nagyobb pontosságú csillagkoordinátákat tartalmaz. Az ESA asztrometriai küldetésű Hipparcos mesterséges holdja immár a földi légkörön kívülről, s ezzel a korábbi földi méréseknél pontosabban határozhatta meg a csillagok helyzetét, parallaxisát és saját mozgását.

Neve is innen származik: Hipparcos, High Precision Parallax Collecting Satellite.

### VLBI

Az egymástól több ezer km távolságra lévő nagy méretű és érzékeny rádioteleszkópok veszik az extragalaktikus rádióforrásokról, kvazárokról érkező rádiójeleket. Valamely rádiójel minden teleszkóphoz más-más időpontban érkezik be. Mérik a beérkezési időpontok különbségét. Az inerciarendszert legjobban megközelítő vonatkoztatási rendszert kijelölő kompakt rádióforrások térbeli iránya az égbolton akár az ezredmásodperc töredékének megfelelő pontossággal ismert. A mért késési időkből és a kvazárok irányadataiból akár néhány mm-pontossággal meghatározható a földi bázisvonal vektora (hossza és térbeli iránya). Geometriai elvét az 5. ábra mutatja. Általa meghatározhatók a Föld forgásának adatai és azok változásai (a forgástengely iránya és a forgás sebessége). A VLBI a Nemzetközi Égi Vonatkoztatási Rendszer alapja és keretrendszerének egyetlen alkotója [6]. Ugyanakkor, a földi vonatkoztatási rendszerek egyik alapja és teleszkópjai e keretrendszerek egyik alkotója.

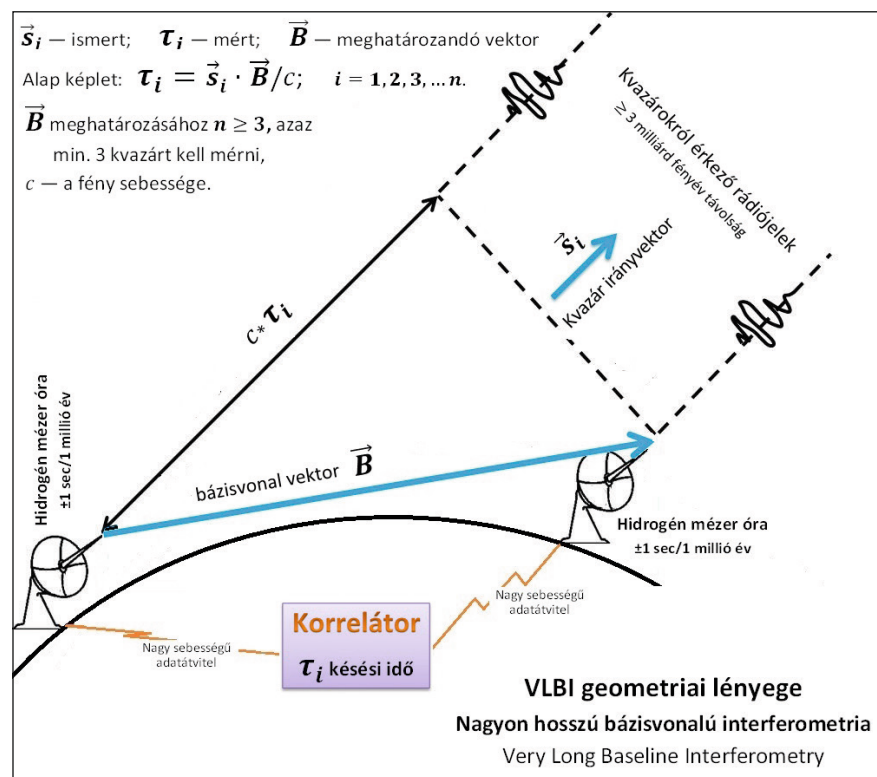
### A műholdas lézeres távolságmérésről

A lézeres távolságmérés kezdetén a földi lézergyűk pontossága sok méterben volt kifejezhető, amelyeket az 1964-ben felbocsátott Beacon-B lézertükrös műholdhoz használtak. Pályára bocsátották 1965-ben a Beacon-C és a GEOS-A, 1967-ben a Diademe-1, Diademe-2, 1968-ban a GEOS-B és 1970-ben a PEOLE nevű műholdakat, fedélzetükön az akár dm-pontos mérést lehetővé tevő lézertükrökkel. A GEOS-A és GEOS-B holdak az 1. táblázatban láthatók. Ezekhez alakították ki a lézergyűk képességét is. A második generációs eszközök  $\pm 1$  m pontosságúak voltak. Ilyen lézergyű volt az NDK gyártmányú SBG nevű fotografikus kamerára felszerelt lézergyű – a KGO is rendelkezett egy példánnyal (3. táblázat).

A harmadik generációs, vagy a későbbi lézergyűk mérési képessége eléri a dm, cm vagy annál nagyobb pontosságot. Ezt szolgálják pl. a Starlette (1975), a LAGEOS-1 (1976), a LAGEOS-2 (1992) és a Stella (1993) lézeres műholdak (2. táblázat). A földi pontokon működő lézergyűk iránti követelmények: nagy energiájú lézerimpulzus kibocsátása, az impulzus futásiidejének pontos mérése, pontos és nagyon érzékeny fotondetektorok, mozgékony lézergyű-felépítmény, nagyon stabil atomóra, nappali mérési képesség és keskeny sávú szűrők alkalmazása, automatizáltság és részvétel hálózati együttműködésben. A műholdas lézeres távolságmérés (Satellite Laser Ranging, SLR) a földi vonatkoztatási rendszerek egyik alapja, állomásai e keretrendszerek alkotója [7].

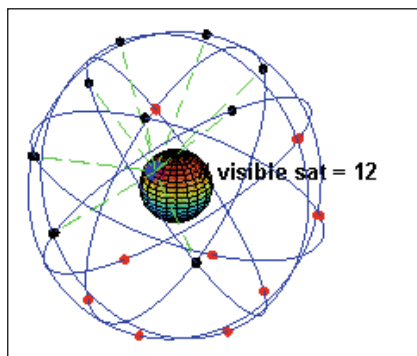
### A Holdra végzett lézeres távolságmérések

Párizsban a Hold-megfigyelési Adatok Elemző Központja tette közzé, hogy az 1969-től 2015-ig tartó időszakban a világon öt obszervatórium végzett (már egyébként cm-pontosságú) LLR-méréseket. A lézeres távmérések az Apollo-11, a Lunahod-1, az Apollo-14, az Apollo-15 és a Lunahod-2 expedíciók által a Hold felszínén elhelyezett tükrökre történnek. Az LLR egyik alapja a földi vonatkoztatási rendszereknek és obszervatóriumai e keretrendszerek alkotója, az ILRS része [8].



5. ábra. VLBI geometriai lényege





6. ábra. NAVSTAR GPS

### Globális műholdas helymeghatározó rendszerek (GNSS)

A ma már mindennapos globális műholdas helymeghatározó rendszerekben (első közülük az USA NAVSTAR GPS, 6. ábra) a pályák közel kör alakúak,  $h=20233$  km,  $i=55^\circ$ , 6 pályasíkban 4-4 műhold található, egyenletesen elosztva. Sugárzott jelei  $L1=1575$  MHz és  $L2=1227$  MHz frekvenciájúak. Mérési kódjai: durva adatnyerési C/A kód, 1023 kbit/sec és precíziós P kód, 10,23 MHz. Sugárzott pályainformációk: Kepler-féle pályaelemek és almanach. Jól szervezett földi követő hálózata működik. Pontossága mm, cm vagy m körüli, észleléstől és feldolgozástól függően. A földi vonatkoztatási rendszerek egyik alapja és állomásai e keretrendszerek alkotója [9].

### DORIS rendszer

A francia DORIS egy polgári célú, pontos pálya- és helymeghatározó rendszer. A földi állomások adóköszülékei által kibocsátott jelek a műhold fedélzeti vevőegységéhez érve a Dopplereffektus elve alapján csúszást szenvednek, aminek a mérését a fedélzeti ultrastabil oszcillátor biztosítja. A Doppler-csúszás alapján  $\pm 1$  cm pontos pályameghatározás biztosítható. Érdekeltségi alapon szolgál ki különféle küldetésű műholdakat: a fedélzeti és a földi szegmens eszközeit és logisztikáját a gyártók szállítják és installálják. Több mint egy tucat ESA-műholdon látta el a vonatkozó feladatokat (SPOT-holdak, Envisat és 2016-tól a Sentinel-3A). Nemzetközi DORIS Szolgálat működik, amely pályameghatározási és dinamikai feladatokat lát el, és egyik alapja a földi vonatkoztatási rendszer definiálásának, az IAG keretében [10].

### InSAR műholdradar interferometria módszer

A műholdakon elhelyezett antenna elektromágneses mikrohullámokat sugároz, amelyek a földfelszínről visszaverődve a fedélzeten rögzítésre kerülnek. Két radarkép, vagy sok radarfelvétel pontjai közötti fázisdifferencia okozta interferenciát állít elő. Nagy felbontásban ( $500 \div 1000$  pont/km<sup>2</sup>) és nagy pontossággal ( $0,1 \div 0,2$  mm/év) lehet leképezni a földfelszín változásait. A Sentinel-1A és Sentinel-1B nevű ESA-műholdak hat napos ciklusonként adnak InSAR-lefedettséget mm-es, ill. annál pontosabb változások méréséhez [11].

## 4. A Bajai Observatórium szerepe

Az űrkutatás elejétől III Márton csillagász vezetésével rendszeres műholdmegfigyelések folytak a Bajai Observatóriumban.

### Az Observatórium tevékenysége

- Optikai műholdmegfigyelések végrehajtása* 1958-tól kb. 15 éven keresztül: Passzív és aktív műholdak megfigyelése AT-1 vizuális követő távcsővel, TZK típusú vizuális távcsővel, a DVT digitvizuális követő távcsővel, NAFA-3c/25 kamerával történt felső légköri vizsgálatok céljára. Geodéziai célra az AFU-75 fotografikus műholdmegfigyelő kamera állt rendelkezésre, amely időben  $\pm 0,001$  sec, műholdirányban  $\pm 0,5 \div 2^\circ$  pontosságot produkált (3. táblázat). Az AFU-75 kamerát én szereltem fel és üzemeltem be 1969-ben.
- Időszolgálati feladatok ellátása:* Kronométer, kvarcóra és atomóra képezte az időszolgálatot. A nemzetközi időjeladók másodperceleihez történő szinkronizálásuk rádióvevővel történt.
- Együttműködés a szovjet KOZMOSZ és az amerikai SAO műhold-pályaszámító központokkal*
- Kutatási feladatok:* A felső légkör kutatása, paramétereinek modellezése (légsűrűség, hőmérséklet, nyomás és változásai, geomágneses viharok hatása), fotometriai vizsgálatok.

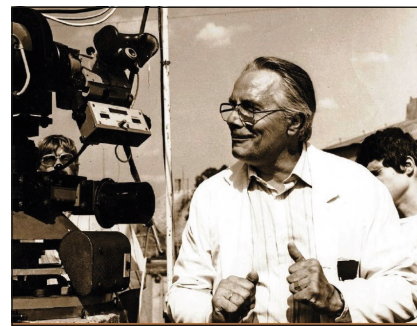
- Kutatási és együttműködési programok megvalósítása hazai és főleg nemzetközi viszonylatban.*

### Együttműködés az Állami földméréssel

Az MTA Csillagászati Intézet és az Állami Földmérés közötti együttműködésben a geodéziai célú műholdmegfigyelési gyakorlat megszerzéséhez szükséges ismereteket, helyet és eszközöket 1967-től a Bajai Observatórium biztosította. Kezdetben hárman (Oravecz Gábor, Walch Emil és Mihály Szabolcs) vetünk részt vizuális műholdmegfigyelésekben. Ezt követően geodéziai célú műholdmegfigyeléseket végeztünk, időrendben Mihály Szabolcs, Vass Tamás, Nagy Sándor és Borza Tibor, egymást váltva.

### Emlékezés III Mártonra

III Márton DSc, hab. prof. (1930, Vaskút – 2015, Kanada) munkássága szorosan összekapcsolódott az űrkutatás hőskörével, amikor az első mesterséges holdak megfigyelésével a Föld addig még ismeretlen felső légkörét először megismerni, majd részleteit feltárni, s azt az űrkutatásban alkalmazni és oktatni kellett. Franciául, németül és oroszul is kifogástalanul beszélt. Egykori szovjet munkatársai Leningrádban vagy Moszkvában ugyanazzal a lelkes bajai tudóssal találkoztak, mint akit szívesen fogadtak a francia munkatársak. Egyéni ötleteivel, kísérletező kedvével számtalan téren vitte előre a tudományterületét. Az Observatórium, ill. saját műholdas megfigyeléseit és eredményeit lelkesedéssel adta tovább mind a hazai, mind a külföldi munkatársaknak. A Bajai Observatóriumot nemzetközi kutatóhellyé fejlesztette. Kandidátusi címét a



7. ábra. III Márton a DVT jelű digitvizuális műholdmegfigyelő távcső mellett a Bajai Observatóriumban, kb. 1970

Szovjet Tudományos Akadémián védte meg oroszul, akadémiai nagydoktori értekezését az MTA keretében, magyarul. Együttműködést vállalt az Állami Földméréssel, s kiemelkedő szerepe volt a geodéziai célú műholdmegfigyelésekkel ismerkedő földmérők műholdas gyakorlatának szerzésében.

Tisztelettel emlékezem rá. A 7. ábra őt ábrázolja, amint a DVT jelű digitvizuális műholdmegfigyelő távcső mellett lendületesen magyaráz.

## 5. A Kozmikus Geodéziai Observatórium és mérőföldkövei

A KGO működése kitűnően nyomon követhető a fennállásának 40. évfordulójára a [http://www.sgo.fomi.hu/kgo\\_tortenete.php](http://www.sgo.fomi.hu/kgo_tortenete.php) honlapcím alatt megjelent többkötetes ismertetés révén. Értékes szakmai részletek találhatók a <http://www.sgo.fomi.hu> honlap további fejezeteiben.

### A szervezetről

A Penci Observatórium 1976-ban épült fel (8. ábra), de a KGO szervezeti szintű létrehozása már 1972-ben megtörtént, a FÖMI keretei között. Eleinte főosztályként, később osztályként működött. Alapító vezetője Almár Iván volt. Őt követték Alpár Gyula, Mihály Szabolcs, Fejes István, Borza Tibor és Kenyeres Ambrus. 1972-től 2016-ig 83 dolgozója volt. A KGO műholdas korszakát a 3. táblázat szemlélteti.

### 5.1. Az NNSS doppleres korszak eredményei

#### 5.1.1. Szoftverfejlesztések és hozadéka

**SADOSA elnevezésű szoftver** kidolgozása és elkészítése (1980-tól): Műholdas rövid pályaiű fél-dinamikai módszer alkalmazásával doppleres műholdmegfigyelések eredményeiből állomáskoordináták meghatározására, azokhoz variancia- és kovarianciamátrix és hibaellipszoid-paraméterek számítása [12].

**Doppler Baseline Interferometry, DBLI-módszer** kidolgozása [13]. A kritikus időhibákat atomóraadatokkal kiküszöbölte. A Penc-Baja és Potsdam-Berlin vektorokat

$\pm 0,2 \div 0,3$  m pontossággal határoztuk meg. A GPS megjelenésével a módszer túlhaladtá vált.

**FotoDoppler módszer** kidolgozása és alkalmazása [14]. Ez egy módszer volt a doppleres és a fotografikus észlelések egyidejű alkalmazására. A kor ennek az alkalmazását is túlhaladta.

**Hozadékok:** Az USA JMR cég érdeklétté vált a SADOSA szoftverben és a DBLI-módszerben [15], amiért két, igen nagy értékű JMR készülékkel fizetett. A SADOSA szoftvert a Szovjetunió Geodéziai Szolgálat is megvásárolta.

#### 5.1.2. Magyarországi doppleres észlelési kampányok

A magyar hálózatban három magyar doppleres észlelési kampányt (HDOC, Hungarian Doppler Observation Campaign) hajtottunk végre a KGO 3 db JMR, a BME és a GGKI közös tulajdonú CMA751 és a Potsdami Intézet től alkalmilag kölcsönzött JMR készülékekkel. A méréseket a SADOSA és a GEODOP szoftverekkel dolgoztuk fel, és alkalmaztuk az alaphálózat minősítésére [16] és [17].

**HDOC80:** A magyar vízszintes hálózat 6 pontján, két műszerrel és transzlációs üzemmódban, állomáspáronként



8. ábra. A Kozmikus Geodéziai Observatórium épülete

3. táblázat.

A KGO műholdas korszakainak bemutatása és értékelése

$\pm 10 \div 15$ m hálózati mérésből	$\pm 0,5 \div 1$ m hálózati mérésből	
 <p>Fotografikus műhold észlelések AFU-75, FAS, SBG 1970-1983</p>	 <p>Doppleres Transit műhold észlelések JMR1 vevők 1977-1988</p>	Kiemelkedő korszak a KGO életében: nemzetközi és Közép-Kelet Európai tevékenysége és eredményei
 <p>Lézeres műhold észlelések SBG lézeres rátét 1977-1987</p>	 <p>GPS és GNSS GPS vevők, GPS karórák (LBS) 1990-től</p>	
$\pm 1 \div 2$ m az akkori lézereknél	$\leq 1$ cm promt mérésből	





9. ábra. HDOC82 mérési kampány a magyar geodéziai hálózatban

történtek az észlelések. Ezzel előzetesen megtörtént a magyar alaphálózat elhelyezése, továbbá tájékoztásának és méretarányának ellenőrzése a WGS72 geodéziai világrendszerben.

**HDOC82:** A magyar hálózat 14 pontján, öt műszerrel és multilokációs üzemmódban bonyolítottuk le a kampányt (9. ábra). A doppleres és a hagyományos hálózat közötti transzformáció a hagyományos hálózat elhelyezését, tájékoztását és méretarányát adta WGS72 rendszerben. A transzformációkban a súlyegység középpontja  $\pm 0.3 \div 0.4$  m volt.

**HDOC85:** Az EOMA 5 db főalappontján és a magyar stelláris háromszögelésben szereplő 7 db ponton (összesen 12 ponton), három JMR műszerrel és multilokációs üzemmódban végeztünk doppleres műholdas helymeghatározást. A feldolgozás és az elemzések integrált geodéziai hálózati szempontból előremutatók voltak.

**Mérések a referenciaponton:** Az NNSS rendszer által képviselt koordináta-rendszer viselkedését és változásait monitoroztuk a KGO referenciapontján 1978-tól egy évtizeden át végzett rendszeres doppleres észlelésekkel. A számított koordináták spektrális analízisét Ádám József végezte [18]. Periodikus koordináta-változásokat mutatott ki.

### 5.1.3. Nemzetközi doppleres észlelési kampányok

**Nyugat- és Kelet-európai kampányok:** Az akkori hidegháborús hangulat közepette a geodéziai hálózatok tekintetében a WEDOC elnevezésű Nyugat- és Kelet-európai Doppleres Műholdmegfigyelési Kampányok

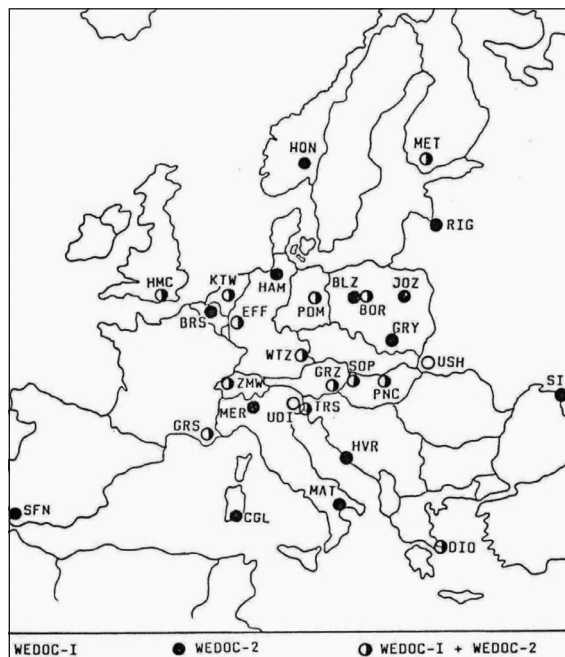
nemzetközi nyitást jelentettek, hidat a Nyugat és a Kelet országai között, a „vasfüggönyön” át!

A WEDOC koordinációját a Grazi Observatórium és a KGO látta el. A 10. ábra az állomáshálózatot mutatja. Az akkori „két világban” a nemzeti, az európai (ED50, ED79), a kelet-európai S42 és a WGS72 rendszerek közötti kapcsolatok létesítése volt a cél.

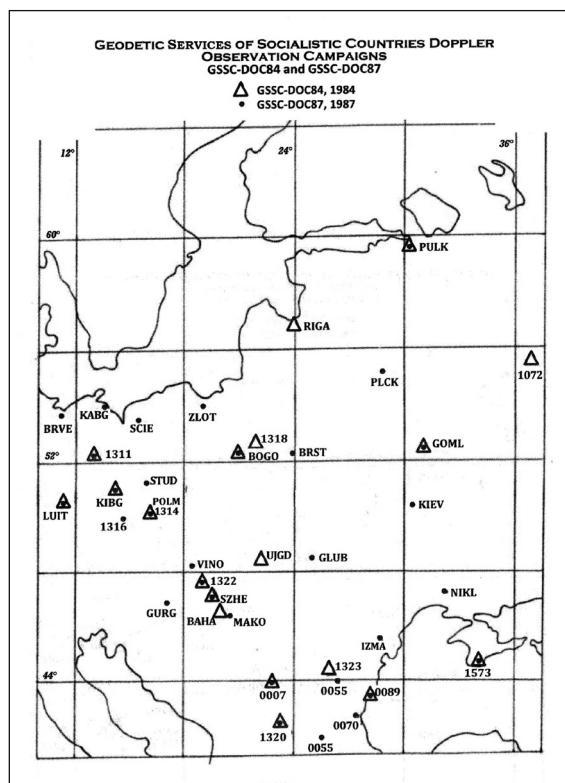
A WEDOC-1 (1980, 15 állomás) és a WEDOC-2 (1983, 27 állomás) kampányok méréseit a SADOSA programmal és a Grazi Observatórium GEODOP szoftverével dolgoztuk fel [19]. és [20] Eredményül megkaptuk a 27 állomás WGS72 rendszerű 3D koordinátáit és pontossági adatait, valamint a feldolgozó szoftverek, a kampányok és az ED50 és ED79 európai dátumok viszonylatában kifejezett transzformációs paramétereket. Az ellentmondásokból  $\sigma_0$  értéke  $\pm 0,5 \div 0,7$  m között volt, a relációtól függően. A méréseket a FÖMI adattárában helyeztük el.

### A Szocialista Országok Geodéziai Szolgálatai doppleres észlelési kampányai

A GSSC-DOC elnevezésű kampányok 1984-ben és 1987-ben valósultak meg



10. ábra. WEDOC-1 és WEDOC-2 európai kampányok állomásai



11. ábra. GSSC-DOC84 és GSSC-DOC87 kelet-európai kampányok állomásai

(11. ábra). A koordinátor a FÖMI KGO volt. A kampányok célja a szovjet S42 rendszerben lévő hálózatok WGS72 geodéziai világrendszerben történő összekapcsolása volt.

A GSSC-DOC84 (1984, 19 pont) és a GSSC-DOC87 (1987, 31 pont) kampányok méréseinek feldolgozását a KGO



és a moszkvai CNIIGAiK intézet vállalták [21] és [22].

Eredmény: Jó mérések születtek, a feldolgozás megtörtént, de a kiegyenlítés eredményei nem kerültek nyilvánosságra. A transzformációk számítása és az eredmények elemzése elmaradt, a rendszerváltás miatt ez a fajta együttműködés leállt. A mérések a FÖMI adatárában vannak.

**További nemzetközi doppleres együttműködések:**

A 16 pontos Interkozmosz világhálózat doppleres meghatározása, ICDOC [21];

Finn–magyar doppleres észlelési kampány, FHD0C a finn hálózat egy részének lefedésére; a SADOSA- és a GEODO-féle megoldások  $\pm 0,46$  m-re egyeztek; az ED50-el transzformálva, az ellentmondásokból számított közép-hiba  $\pm 0,52$  és  $\pm 0,36$  m volt [23].

**5.2. Eredmények a GPS-korszakban**

**5.2.1. A GPS bevezetésének időszaka az 1990-s évek elején**

A GPS geodéziai szerepét már 1987-ben elemeztük [24]. A KGO munkájában a GPS – a doppleres előzményeken és DBLI-módszeren túl – a Delfti Műszaki Egyetemről Husti György támogatásával jelent meg. Két vevőkészülék hoztak, és 1989-ben sor kerülhetett az első hazai GPS alapú hálózati bemutató mérésre [25]. Bizonyító ereje volt, és 1990-ben elindult a

GPS-vevők beszerzése és a GPS alkalmazásának hazai fellendülése.

A GPS bevezetésének a tudatában már 1989-től előadásokat tartottunk, jegyzetet írtunk és tanfolyamokat szerveztünk kollégáink számára a felsőoktatásban, a vezetők szintjén és a vállalati szférában [26]. Ez további lendületet adott a GPS bevezetéséhez.

A IV. rendű vízszintes hálózat méréseinek már majdnem két évtizede haladó lezárását is GPS mérésekkel oldotta meg a FÖMI KGO a '90-s évek elején, két év alatt, a BGTV-vel és a PGTV-vel. A magyar felsőrendű geodéziai hálózat GPS-szemléletű továbbfejlesztését KGO javaslatára és az MTA Geodéziai Tudományos Bizottság keretében megvitatta terveztük meg [27].

1991-ben kezdődött el a PENC elnevezésű GPS-referenciaállomás működtetése és az EUREF hálózathoz való csatlakozás. PENC állomás része lett a Nemzetköz GPS Szolgáltatnak, az EUREF Permanens Állomáshálózatnak (12. ábra) és a hazai GNSSnet.hu hálózatának. Ezek az ETRS89 Európai Földi Vonatkoztatási Rendszerhez való kapcsolódást is jelentették.

A Magyar GPS Geodinamikai Alapponthálózat (MGGA) mérése is 1991-ben kezdődött, 24 ponton. A két-évenkénti mérések ismételtetősége vízszintesen  $2 \div 3$  mm és magasság szerint  $6 \div 7$  mm volt, ez ma  $1 \div 2$  mm és  $3 \div 5$  mm.

Ebben az évben szerveztük meg Pencen az első GPS in Central Europe elnevezésű, később két évente, összesen

öt alkalommal sorra kerülő nemzetközi szemináriumot, amely a fejlesztési és alkalmazási ötletek tárháza és az elvégzett munkák eredményeinek vitafóruma volt. Tudományos haszonnal járt, és a hatékonyság eszköze volt.

A FÖMI KGO a Bernese nevű, GPS-alapú feldolgozó programot 1992-ben vásárolta meg. 2001 óta a KGO az EUREF (EPN) egyik feldolgozási központja. Jelenleg az EUREF Műszaki Munkacsoport irányítója Kenyeres Ambrus.

Magyar–lengyel kezdeményezésre, 11 ország részvételével, 1993-ban jelenkori tektonikai mozgások mérésére jött létre a Közép-európai GPS Geodinamikai Referencia Hálózat, a CEGRN (13. ábra). Ennek része volt a magyar MGGA is.

E geodinamikai hálózatok koordinátora a nemzetközileg is köztiszteletnek örvendő Fejes István kollégám volt. A GPS hazai hálózati alkalmazásait és megvalósításait Borza Tibor kollégám irányította sikeresen.

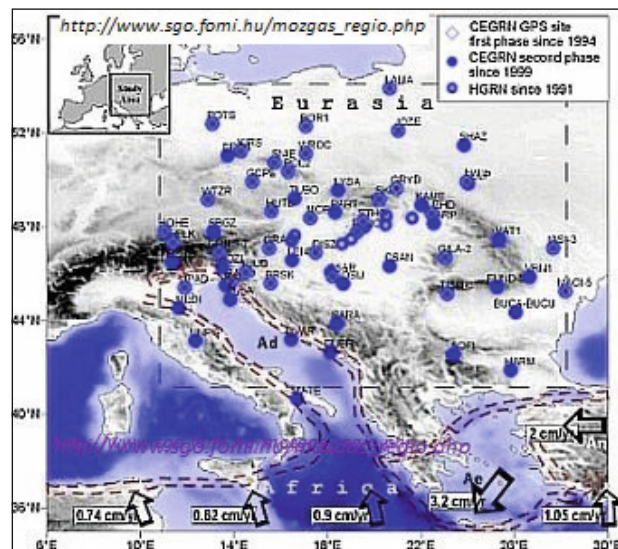
A GPS magyarországi bevezetéséért végzett tevékenységük elismeréseként 1993-ban a Magyar Tudományos Akadémia megosztott Akadémiai Díjat adományozott Bányai László, Borza Tibor, Fejes István, Mihály Szabolcs és Varga Márta részére [28].

**5.2.2. Az GPS hálózati és geodinamikai alkalmazása**

A KGO 1995–97 között létrehozta a 1153 pontból álló Országos GPS Hálózatot [29]. Az EOV és az ETRS89 közötti átszámítás országos transzformációs



12. ábra. EUREF Permanens Hálózat, EPN



13. ábra. Közép-európai GPS Geodinamikai Referencia Hálózat

állandókkal történhet. A lokális megoldások pontosabbak: valós idejű célra a VITEL és felülvizsgált változatai (VITEL2009, VITEL2014) szolgáltak.

Az Európai Helymeghatározó Rendszer (EUPOS) kezdeményezéshez is csatlakoztunk.

2007-ben az OGPSh-kerethálózatot újramértük, együtt a HGRN-hálózattal, és létrehoztuk a Magyar GPS Geodinamikai Alaphálózatot, a MGGA-t. Rendszeres méréssel, több mint 18 év után megállapítható, hogy szignifikáns mozgások vannak az ország területén, zsugorodás észlelhető.

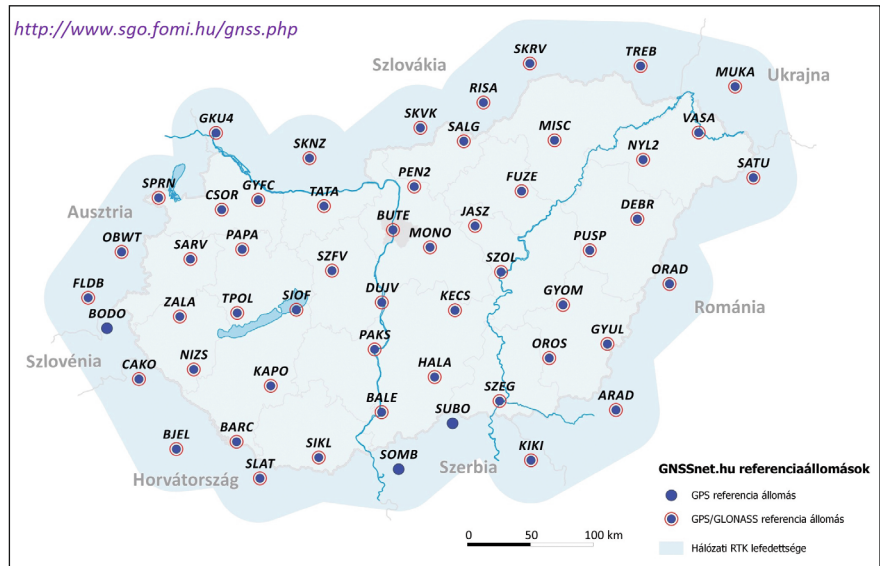
A HD72 magyar geodéziai dátum csatlakoztatása az európai ED87 dátum szerinti rendszerbe GPS-szel, és a magasági hálózat bekapcsolása az Egyesített Európai Szintezési Hálózatba (UENL) az Európai Magassági Vonatkoztatási Hálózat (EUVN97) mérésekor, 1996–97-ben történt meg.

Az országos GNSS Szolgáltató Központ, a GSzK létrehozása 2003-ban kezdődött. A GNSS földi infrastruktúra működése 2009-ben teljeskörűvé vált. A GSzK 35 hazai és 19 határon túli állomás (14. ábra) folyamatos és valós idejű észlelései alapján szolgált mobilinterneten keresztül, valós idejű korrekciókkal, utólagos adatszolgáltatással és feldolgozással, flottakövetési formációban, transzformációs megoldásokkal, ügyelettel. A GSzK korrekciós adatainak segítségével bárhol az országban akár centiméteres pontosságú, valós idejű helymeghatározásra nyílik lehetőség akár egyetlen GNSS-vevővel az intelligens közlekedés, a precíz mezőgazdaság, a környezetvédelem, a nagy méretarányú térképezés kiszolgálására.

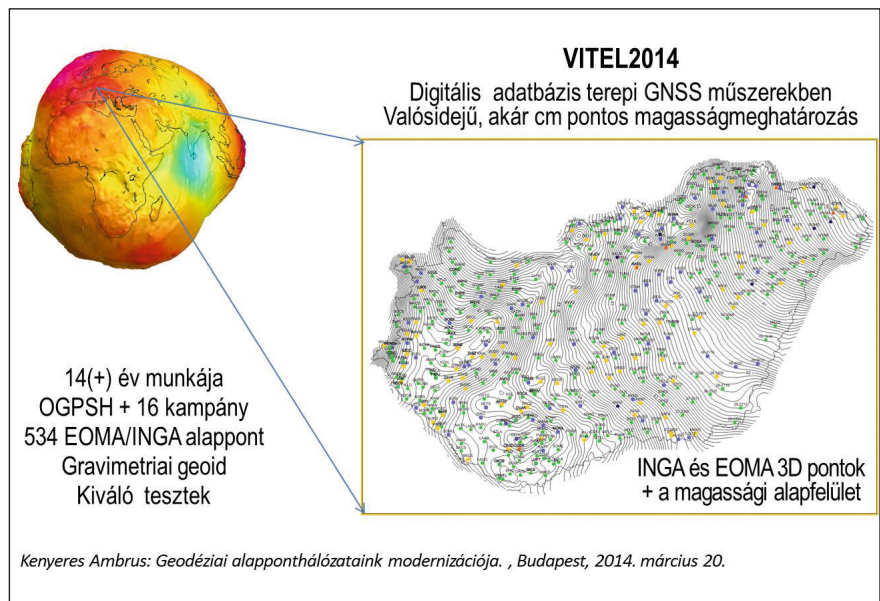
### 5.2.3. Geoid és a magasság a GPS/GNSS-korszakban

A GPS-alapú magasságkülönbség meghatározás pontossága cm-es tartományban van. A korábban szintezéssel történő magasságmérést GPS-módszerrel lehet helyettesíteni, különös tekintettel a vonal menti hibahalmozódás elkerülésére és a munka hatékonyságára. Ehhez azonban ugyanilyen pontossággal ismerni kell a geoidmagasságot az adott mérési helyen.

Az első digitális gravimetriai geoid magyar darabját a FÖMI KGO



14. ábra. Aktív GNSS Hálózat



15. ábra. HGGG2014 gravimetriai geoid a GNSS magassági alapfelülete

1991-ben állította elő. Az OMFb támogatásából 1995-ben gravimetriai geoidtérkép készült. Az 1999-ben készült HGEO95B jelű geoidmegoldás volt az első, deciméternél jobb pontosságú. Megjelentek a fejlesztésekben a vezető szerepet játszó Kenyeres Ambrus által meghatározott megoldások: a HGEO2000 és HGGG2000, gravimetriai + szintezési és tisztán gravimetriai adatok felhasználásával [30].

A gravimetriai alapú HGGG2014 jelű magyar geoidfelület-darab  $1 \div 3$  cm magassági pontosságot biztosít. A HGGG2014 megoldásra alapozott rendszerben (15. ábra) a VITEL2014 országos transzformációs szoftver hordozza a geoid adatait, és biztosítja

a kétirányú transzformációt, amely terepi használatra alkalmas [31].

GPS segítségével történő magasságmeghatározásra 1998-ban technológiát dolgoztak ki a III. rendű szintezés kiváltására. Az EOMA-sűrítést a FÖMI 2000-től ezzel folytatta, sikeresen. A módszer gyors, hatékony és költségkímélő, pontossága kielégíti a III. rendű magassági hálózat követelményeit.

### 5.2.4. Integrált geodéziai hálózat

A 2000-s évek elején a GPS bebizonyította, hogy a mindennapi földi mérések számára szükséges viszonyítási alapot immár nem csak a földi hálózatok biztosítják, hanem a műholdpályák által fizikailag megvalósuló vonatkoztatási



keretek is kitűnően alkalmasak erre, sok más előnyük mellett.

Az MTA Geodéziai Tudományos Bizottsága (GTB) 2006. május 4-én vitaülést tartott a hagyományos geodéziai hálózatok és a GNSS földi infrastruktúra jövőjéről. A Bizottság ajánlása alapján a FÖMI javaslatát mutattam be a GTB 2006. október 26-i soproni ülésén [32]. Az alábbi hálózati elemek integrálását javasoltam:

- a hálózat stabilan állandósított 300 ÷ 600 pont, amelyek rendelkeznek ETRS89 rendszerű koordinátákkal, pontos EOMA-alapú magassággal és gravimetriai mérési adatokkal;
- I. rendű magassági hálózatunk pontjai, új nagy pontosságú szintezéssel és GNSS-mérésekkel;
- a magyar gravimetriai alaphálózat I. rendű hálózati pontjai;
- az aktív GPS-hálózat pontjai mint földi referenciaállomások.

A feladat részletes kidolgozására MTA GTB ad hoc bizottság működött, és EOMA modernizáció címmel javaslatot készített [33]. Ezt támogatta az MTA X. osztály elnöke és az MTA elnöke. Felterjesztettük az FVM miniszterének támogatás céljából és a Földügyi és Térképészeti Főosztálynak a végrehajtás javasolásával. Miniszteri visszajelzést nem kaptunk.

Az Állami Földmérés számára ez a javaslat képezi az alapját a mai EOMAKorszerűsítési munkáknak és az integrált geodéziai hálózat feladatmegoldásának. A kb. 1000 pontból álló, INGA elnevezésű hálózat kialakítása a FÖMI komplex feladata.

### 5.3. Űr-VLBI kutatások

Az űr-VLBI technika a VLBI-bázisvonalakat valamely mesterséges hold fedélzetén elhelyezett rádióteleszkóp segítségével akár a Föld átmérőjénél is nagyobbra nyújtja. Potenciális geodéziai, geofizikai alkalmazásai lehetnek. Ezek elméleti kutatásában a KGO munkatársai nemzetközi szinten úttörő szerepet játszottak. Az űr-VLBI alkalmasságát javasoltuk a geocentrikus földi és égi vonatkoztatási rendszerek közvetlen összekapcsolására, a földi antennák geocentrikus pozíciójának meghatározására és az űr-VLBI mesterséges holdak pályájának pontosabb

meghatározására. Az űr-VLBI kutatásában az 1980-as évek végétől többen részt vettünk, nemzetközi publikációkkal és előadásokkal is ([34], [35], [36] és [37]). A KGO-ban a téma meghonosítása Fejes István (1939–2011) munkatársam nevéhez fűződik.

A KGO-t az IVS Nemzetközi VLBI Szolgálat tagjává választották 2000-ben.

### 5.4. Műholdradar-interferometriai kutatások

A KGO-ban Grenczy Gyula végzett kutatásokat, <http://www.sgo.fomi.hu/InSAR/>. Az ajkai vörösiszap-katasztrófa színhelyének mozgásvizsgálatára, vagy éppen Kőbányán a pincék miatti felszínmozgások vizsgálatára eredményesen használta az ESA archívumából származó InSAR-adatokat. Eredményeit az MTA Földtudományi Osztály ülésén mutatta be 2012-ben.

## 6. Vonatkoztatási keretrendszerek

A vonatkoztatási rendszerek és azok fizikai megvalósítói, a keretrendszerek biztosítják a térbeli objektumok és események kezeléséhez szükséges egységes szemléletű és közös normák szerinti rendet. A geometriai és gravitációs térben a helymeghatározási, földmérési és térinformatikai tevékenységünk keretét képezik.

A nemzetközi közösség kozmikus geodéziai tevékenységének nagy eredménye, hogy szélső pontosságú *technikai eszközrendszer* jött létre, *térbeli vonatkozású feladataink* jól kezelhető struktúrába rendeződtek, szélső pontosságú *vonatkoztatási keretrendszerek* álltak szolgálatba.

### Űrgeodéziai mérőrendszerek nemzetközi szolgálatba állítása

A Nemzetközi GNSS Szolgálat, az IGS 1994. január 1-től működik, mint az IAG *International GNSS Service* nevű szolgálat;

A műholdas és Hold-távolságmérő rendszerek Nemzetközi SLR és LLR Szolgálat, az ILRS 1998-tól működik, mint az IAG *International Laser Ranging Service* nevű szolgálat;

A Nemzetközi VLBI Szolgálat, az IVS 1999 óta működik, mint az IAG

*International VLBI Service for Geodesy and Astrometry* nevű szolgálat; az IVS tagja még az IAU (Nemzetközi Csillagászati Unió) szervezetnek 2000-tól, és a FAGS (Csillagászati és geofizikai adatelemzési Szolgálatok Szövetsége) szervezetnek 2001-től;

A Nemzetközi DORIS Szolgálat, az IDS 2003. július 1-től működik, mint az IAG *International DORIS Service* nevű szolgálat;

### 6.1. Vonatkoztatási rendszerek és keretek

#### 6.1.1. Nemzetközi Égi Vonatkoztatási Rendszer és keretrendszere

A Föld forgásának és a vonatkoztatási rendszereknek a monitorozását végző IERS Szolgálat (IERS, International Earth Rotation and Reference Systems Service) ajánlására a Nemzetközi Csillagászati Unió 1997. évi 23. Közgyűlése fogadta el az extragalaktikus alapokon nyugvó ICRS-rendszer 1998. január 1-től történő bevezetését. Ez, a VLBI-alapú megoldás az FK5 jelű csillagkatalógusra alapozott rendszert a Hipparcos-féle csillagkatalógus szerinti keretre cserélte le.

Az *ICRS rendszer definíciója*: kezdőpontja a Naprendszer baricentruma, tengelyeinek irányát a kvazárokhoz képest rögzítették, alapsíkja: a J2000,0 epochában megvalósuló középegyenlítőhöz lehető legközelebb eső sík, rektaszcenziójának kezdőpontja a J2000,0 epochában megvalósuló dinamikus tavaszponthoz lehető legközelebb eső irány.

Az űrgeodézia és a csillagászat újabb közös eredménye az *IERS Egyezmény 2010* leírásában ([5]) megfogalmazott, az ICRS Nemzetközi Égi Vonatkoztatási Rendszert (International Celestial Reference System) megvalósító ICRF2 elnevezésű 2009. évi keretrendszer (ICRF, International Celestial Reference Frame), amely 295 db domináns kvazáron alapszik, további 3119 kompakt forrással kiegészítve. Összesen tehát 3414 db kvazárra mutató iránnyal és az IVS-ben VLBI-mérésekkel valósul meg. Az ICRF2-ben a kvazárok száma több mint ötszöröse a korábbi ICRF1-nél, és a tengelyek irányainak stabilitása is kétszer jobb.

### 6.1.2. Nemzetközi Földi Vonatkoztatási Rendszer és kerethálózatai

Az IAG és az IUGG 1991. és 2007. évi határozatai szerint az ITRS egy geocentrikus rendszer, amelynek az origója egybeesik a Föld óceánokkal és atmoszférával együtt értelmezett tömegközéppontjával. Mértékegysége az SI szerinti méter, amelynek helyhez kötésékor a relativisztikus modellt alkalmazzák. Tájékozását kezdettől a BIH Nemzetközi Időszolgálati Iroda 1984,0 epochájú adatai határozzák meg. Az ICRS és ITRS rendszerek közötti kapcsolatot a földforgási paraméterek közvetítik.

Az ITRS Nemzetközi Földi Vonatkoztatási Kerethálózat (ITRF, International Terrestrial Reference Frame) által valósul meg az IVS, ILRS, IGS és IDS szolgálatok állomásain végzett űrgeodéziai mérésekből meghatározott koordináták és sebességértékek és transzformációs paraméterek alapján. Ezeket táblázatban teszik közzé. Az IERS Egyezmény 2010 dokumentumában az ITRF2008 nevű kerethálózat kapott kitüntetett szerepet, s ezért a 16. ábrán ezt mutatom be. Megjegyzem, hogy az ITRS új realizációjaként megjelent az ITRF2014.

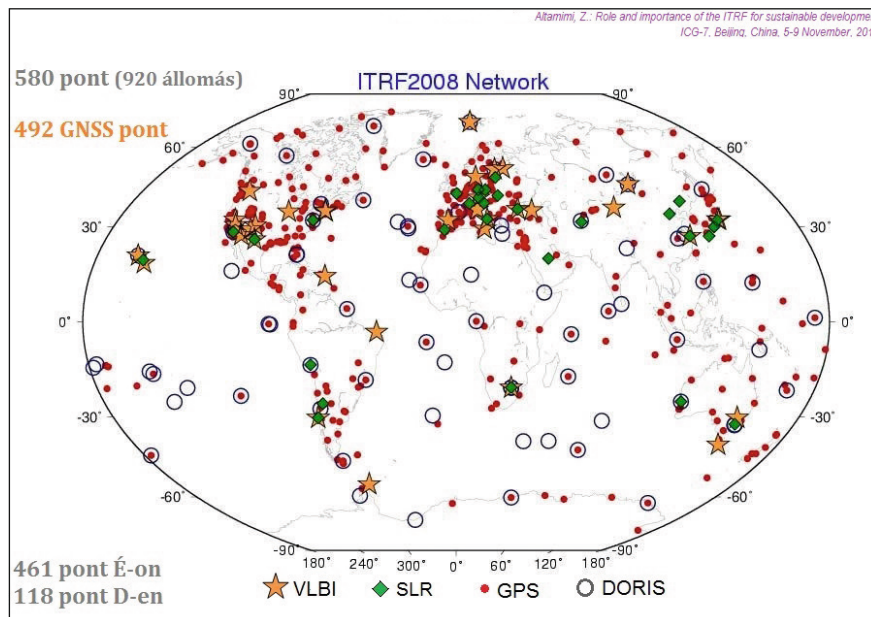
### 6.1.3. WGS84 geodéziai világrendszer

A WGS84 [38] egy Föld-középpontú és a Föld testéhez rögzített földi vonatkoztatási rendszer és geodéziai dátum. A Föld méretét, alakját, nehézségi erőterét és geomágneses terét leíró, egymással konzisztens állandókon és modellparamétereken alapul.

A WGS84 az USA Védelmi Minisztérium szabványos definíciója a téradatok és a GPS-mérések globális vonatkoztatási rendszerére. Hasonlóan az ITRF megoldásaihoz, a WGS84-et is többször újradefiniálták, pontosították úgy, hogy ma már a cm-es szinten kompatibilis a két rendszer.

### 6.1.4. Európai Földi Vonatkoztatási Rendszer és kerethálózatai

Az IAG EUREF Albizottsága az 1990-ben, Firenzében tartott ülésén hozott 1. sz. határozatában az ETRS89 jelű 1989. évi Európai Földi Vonatkoztatási



16. ábra. Az ITRF2008 kerethálózat állomásai

Rendszert az 1989,0 epochájú ITRS vonatkoztatási rendszerrel egybeesőként fogadta el, s azt az ITRF89 jelű 1989. évi kerethálózat részét képező, Európa területén található állomásokhoz kötötte [39].

Az ETRS89 elsődleges hordozója az EUREF Permanens Állomáshálózata (EPN). PENC nevű állomásunk 1996-tól tagja a kerethálózatnak. Az EPN-állomások hivatalos ETRS89 koordinátáit 2009–17 között a KGO vezetője, Kenyeres Ambrus az EPN Referencia Rendszer koordinátoraként határozta meg, illetve 15 hetenként frissítette.

### 6.1.5. Európai Magassági Vonatkoztatási Rendszer

Az EVRS Európai Magassági Vonatkoztatási Rendszert megvalósító EVRF2000 jelű Európai Magassági Vonatkoztatási Kerethálózat nem más, mint az 1998-ban kiegyenlített, UELN95/98 jelű Egyesített Európai Szintezési Hálózat [39]. Az EVRF2000-et 13 magassági alappontra definiálja, ezek egyike a Nadap magasságidátum-pontunk.

### 6.1.6. Nehézségi erőter-modellek és IERS Egyezmény 2010

Az IERS Egyezmény 2010 az EGM2008 jelű modellt ajánlja a Föld nehézségi erőterének képviselőjeként, amely modell a GRACE és a CHAMP nevű műholdakkal nyert mérések, nagy felbontású földfelszíni gravimetriai

mérések, műholdas altimetriai mérések és SLR típusú adatok alapján készült.

A modell tartalmazza a Föld statikus nehézségi erőterének hatását, továbbá a szilárd Föld-árapályt, az óceáni árapályt, a szilárd Föld és az óceánok okozta pólusingadozást figyelembe vevő időfüggő hatásokat. A harmonikus együtthatók 2159 fokig és rendig állnak rendelkezésre, és kiegészítésül további sferikus harmonikus együtthatókat tartalmaz 2190 fokig és 2159 rendig.

### 6.2. Példák a vonatkoztatási rendszerek pontosságára

**Alappélda:** Az űrgeodézia egyik eredménye a Hipparcos-féle csillagkatalóguson alapuló és a VLBI-mérésekkel megvalósuló ICRF2 pontossága: az ICRS tengelyei  $\pm 10$   $\mu$ rcsec értéken belül stabilak, a mérési zajkүszöb 40  $\mu$ rcses (1  $\mu$ rcses az ívmásodperc milliommód része) [5].

**Első példa:** A [http://itrf.ign.fr/trans\\_para.php](http://itrf.ign.fr/trans_para.php) honlap egyszerű kijelentése: a WGS84 és az ITRF2008 cm szinten egyeznek egymással. Konkrétan, a WGS84 és az ITRF2008 közötti összhang a transzformációs együtthatók alábbi középhibáival jól kifejezhető:

- az origó eltolásában mindhárom tengely mentén  $\pm 5,9$  mm középhiba,
- a tengelyek forgatásában az x és y tengely körül  $\pm 0,24$ , a z körül  $\pm 0,22$   $\mu$ rcsec középhiba,



- a méretarányban pedig  $\pm 0,92$  ppb (rész per milliárd) középphiba adódott.

**Második példa:** Az ITRF2008 kerethálózatában a mérési eszközök, a pályaszámítási módszerek és az elméleti fizikai modellek olyan magas szinten működőképesek, hogy a kerethálózat origójának pontossága  $\pm 1$  cm, méretarány-pontossága 1,2 rész per milliárd, az ITRF2000-hez képesti szisztematikus eltérés z-tengely-irányú csavarodásban 1,8 mm/év ([5], Table 0.1).

**Harmadik példa:** Az ITRF2014 és az ITRF2008 kerethálózat között - 127 közös állomásra alapozva - transzformációt számoltak [40]. A 4. táblázatból látható, hogy

- az eltolás értéke 1,6 ÷ 2,4 mm között van,  $\pm 0,1 \div 0,2$  mm középphibával,
- a méretarány értéke  $-0,02 \times 10^{-9}$ ,  $\pm 0,02 \times 10^{-9}$  középphibával,
- mindhárom forgatás értéke 0,000,  $\pm 0,006$  marcsec (ívmásodperc ezred része) középphibával,
- változásai értéke pedig 0-0,1 között mozog, ugyanolyan középphibákkal, mint az értékek.

Leegyszerűsítve, a transzformáció eredménye a kerethálózatok, az űrgeodéziai mérési módszerek, a használt elméleti, fizikai és számítási módszerek mm körüli pontossági képességeiről tanúskodik, föld sugár-nagyságrendekre vonatkoztatva.

**Negyedik példa:** Az EGM2008 nehézségierőtér-modell olyan, hogy ahhoz, hogy a műhold-koordináták számításában 0,5 mm pontosságot érjünk el, pályáik modellezéséhez a modell-együtthatókat elég csupán 90 fokig és rendig használni a 7331 km pályasugarú Starlette nevű műholdnál, 20 fokig és rendig használni a 12270 km pályasugarú LAGEOS nevű műholdnál, vagy éppen 12 fokig és rendig

használni a 26600 km pálya sugarú GPS-műholdaknál.

**Megalapozott a következtetés,** hogy a kozmikus geodézia segítségével

- olyan pontosságú vonatkoztatási kereteket hoztak létre,
- olyan pontosságú műholdpályák hordozzák a vonatkoztatás fizikai alapjait,
- olyan pontosak és egymással összhangban működők a vonatkoztatási keretekhez és a műholdpályákhoz képest helymeghatározást biztosító mérőeszközök,
- és olyan előrehaladott tér- és fizikai modellek állnak rendelkezésre, amelyek föld sugárnyi hosszon ideális esetben csupán mm szintű hibákat produkálnak. Ennél jobb eredményeket 10 vagy 100 m relatív távolságokban sem kapunk hétköznapi mérőeszközökkel.

### 6.3. Űrgeodézia az űripár szolgáltatásban

Az űrgeodézia támogatja a mindig speciális igényekkel fellépő űrkutatást és űripárt. A Föld körül keringő műholdak esetében az előzőekben leírtak bizonyítják a pontossági lehetőségeket. Nézzük meg a közeli és távoli űrobjektumok esetét [41].

**Közeli űrobjektumok esetében:**

- A Hold pályájának és orientációjának mérése LLR-holdlézerrel  $\pm 2$  cm pontosan oldható meg.
- A Doppler-mérések (pl. sebességmérés, fázismérés percnként) elsősorban az űreszközök bolygókhoz képesti helyzetének a meghatározását támogatják a fentiek szerinti pontossággal.
- A radaros távolságmérések (fázismérés 10 percnként) ugyancsak

elsősorban az űreszközök bolygókhoz képesti helyzetének a fentiek szerinti pontos meghatározását támogatják.

- A VLBI-mérések (irány és irányváltozás) a bolygók pályájának bemérését segítik.
- Bolygó mellett elhaladó űreszközöknél a radaros távolságmérés, a doppleres sebességmérés és a VLBI-iránymérés alkalmazhatók a relatív helyzetek és a pályák meghatározására.

### A bolygók és a Hold

**előrejelzésének pontossága:**

- A Hold pályája méternél pontosabban előre jelezhető az LLR és a műholdas gravitációs adatok alapján.
- A belső bolygók pályája kilométernél pontosabban ismert az űreszközön használt rádiós követő módszerek használata által.
- A Marson lévő űreszköz VLBI-típusú méréseivel az orientáció  $\pm 0,0002''$  pontosan határozható meg. Ez a Mars pályája esetén néhány száz km pontosságot jelent.
- A Jupiter és a Szaturnusz pályáját tíz km nagyságrendben kifejezhető pontossággal lehet meghatározni az űreszközök követésének mérési adatai alapján.
- Az Uránusz, a Neptunusz és a Plútó bolygók pályái asztrometriai megfigyelésekből nyerhetők néhány ezer km pontossággal.

## 7. A GNSS piaca

### A hazai GNSS-piacról

A GNSS Szolgáltató Központ által végzett szolgáltatások helyzetét [42] alapján ismertetem. Azt kiegészítve, jó közelítésű számokban elmondható, hogy a GNSS Szolgáltató Központ 2010-ben 700 felhasználót szolgált ki, és 100 M Ft bevételt hozott; 2011-ben több mint 1000 felhasználó és 110 M Ft bevétel, 2013-ban 1600 felhasználó és 127 M Ft bevétel, majd 2015-ben több mint 2200 felhasználó és 200 M Ft bevétel jelent meg.

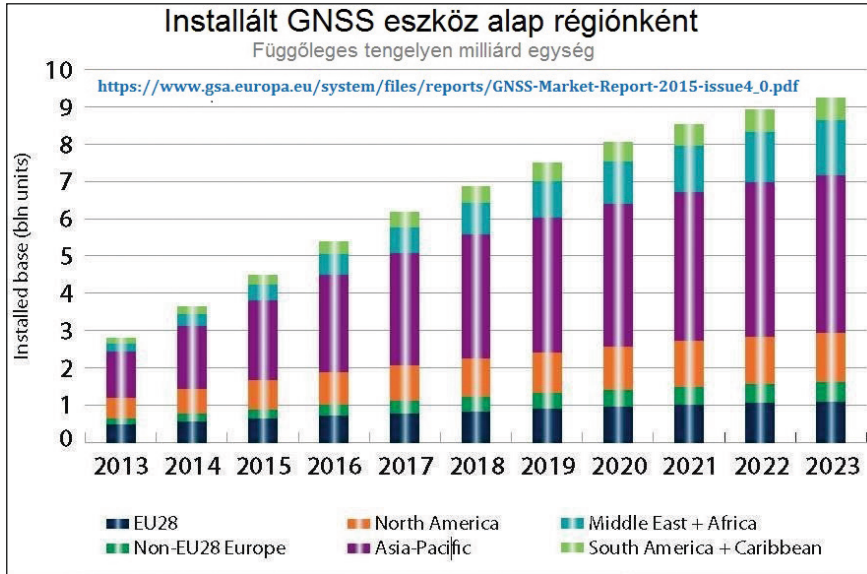
A 2015. évi felhasználók között az alábbi szektorok szerepelnek: földmérés (65%), erdészet (18%), vízügy, agrárium, geofizika, környezetvédelem,

4. táblázat

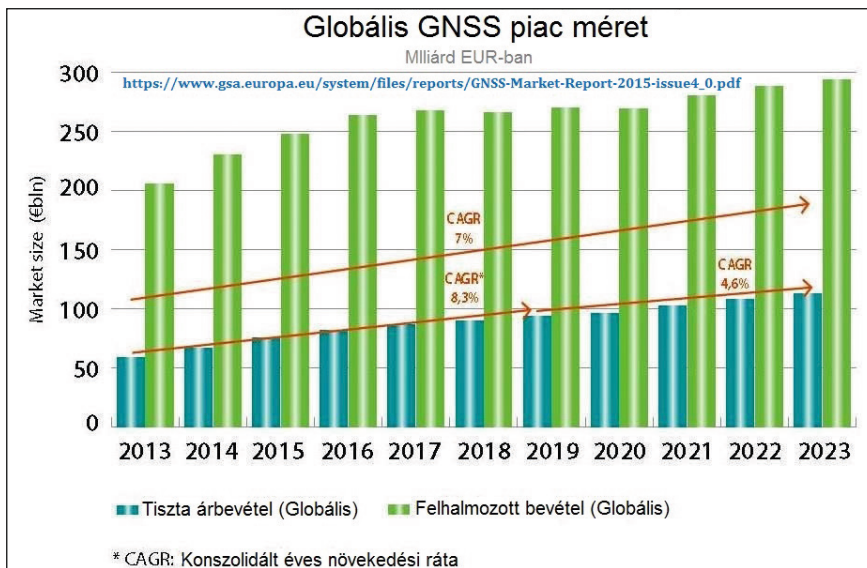
A KGO műholdas korszakainak bemutatása és értékelése

	T1	T2	T3	D	R1	R2	R3
	mm	mm	mm	$10^{-9}$	marcsec	marcsec	marcsec
Transzformációs paraméter értéke	1.6	1.9	2.4	-0.02	0.000	0.000	0.000
Középphibája $\pm$	0.2	0.1	0.1	0.02	0.006	0.006	0.006
Az érték változása	0.0	0.0	-0.1	0.03	0.000	0.000	0.000
Változás középphibája $\pm$	0.2	0.1	0.1	0.02	0.006	0.006	0.006

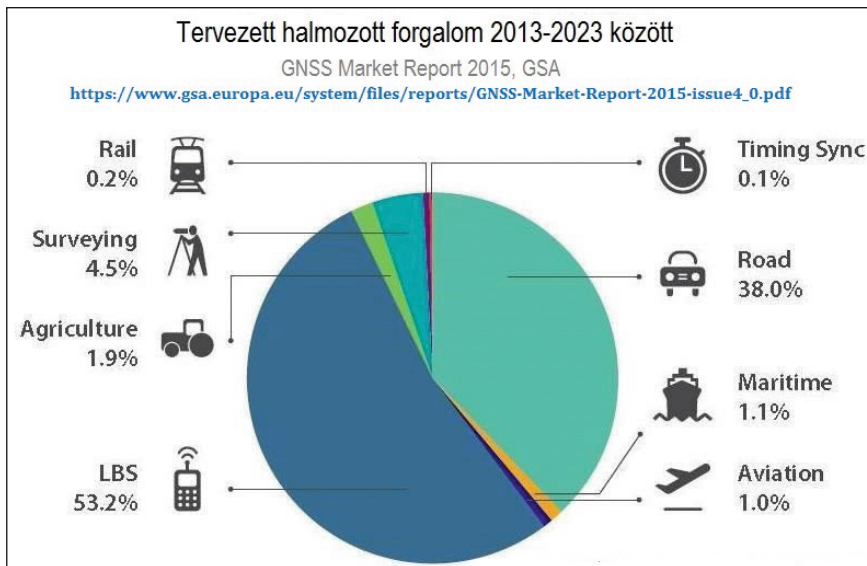
T = origó eltolás; D = méretarány különbség; R = forgatás; marcsec = az ívmásodperc ezred része Forrás: [http://itrf.ign.fr/ITRF\\_solutions/2014/tp\\_14-08.php](http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/tp_14-08.php)



17. ábra. GNSS-készülékek száma régióként



18. ábra. GNSS-piac nagysága



19. ábra. Gazdasági szektorok részesedése a GNSS-piacból

távközlés, út, vasút, légi közlekedés és kevesen a helyfüggő szolgáltatásokat igénylő, nem szektorspecifikus felhasználók közül.

### Nemzetközi GNSS-piac

Az European GNSS Agency (GSA) megvizsgálta a helyfüggő szolgáltatások, út, vasút, légi és tengeri közlekedés, agrárium, földmérés és időszinkronizálás felhasználói területeket [43]. A 17. ábra a vevőkészülékek összesített számát mutatja be régióként. A 18. ábra a GNSS-piac nagyságát, a 19. ábra pedig a szektorok GNSS-piacból való részesedését ábrázolja. A vizsgált régiók neve a képeken látható.

A globális GNSS-piac felhalmozott bevételi szintjét 2016–2020 közötti időszakban stagnálónak állítja be, évente kb. 260 milliárd euró értékben. Összehasonlításként: Magyarországon az EU-s közvetlen agrártámogatások összege évente 400 milliárd Ft körüli.

A 2010–15. évi tényadatok alapján az Ügynökség az alábbi becslést adta:

- A felméréskor a működő GNSS alkalmazói egységek száma 3,6 Mrd volt. Várható számuk 2019-ben 7 Mrd lesz;
- A mobiltelefonok dominanciája (2014-ben 3,08 Mrd) folytatódik, amelyhez 0,26 Mrd útnavigációs alkalmazás kapcsolódik majd;
- Az EU-ban és Észak-Amerikában installált GNSS-vevőegységek száma évente 8%-kal nő;
- Növekedés elsődlegesen az ázsiai, Csendes-óceáni térségekben várható, évi 11%-os ütemben; a 2014. évi 1,7 Mrd egység 2023-ban várhatóan 4,2 Mrd lesz.
- A legnagyobb növekedés (19% évente) a Közel-Keleten és Afrikában várható, mert ez az ipar és alkalmazás ott alacsony szintről indul.

## 8. Mivé nőtte ki magát a kozmikus geodézia?

Rövid válasz: a helyfüggő információk világát szolgáló csúcstechnológiává.

Köszönhetően a GPS-nek és a VLBI, SLR és DORIS mérési eszközök magas színvonalának, az ezekből alkotott IAG felügyeletű nemzetközi szolgáltatoknak, valamint az azok által működtetett



nagy pontosságú nemzetközi vonatkoztatási rendszereknek és kerethálózatoknak, a kozmikus geodézia módszere

- elérhető és használható bárhol, bármikor, bárki által és gombnyomásra;
- képviseli a helymeghatározás időbeni és térbeni folytonosságát, különféle alkalmazásokkal történő integrálhatóságát és robusztus jellegét, erős és stabil megoldásként szolgál;
- kültéri és beltéri feladatokra egyaránt alkalmazható módszerekkel és eszközökkel rendelkezik;
- pontossága igény szerint alakítható (mm, cm, m) és kevéssé függ a mérés időtartamától;
- a helyfüggő szolgáltatások kiszolgálója és motorja;
- a térinformációs infrastruktúra alapja.

A hagyományos földmérési technika átalakul. Egy része megszűnik, más része pedig a műholdas módszerekhez alkalmazkodik. Gyakorivá válik a műholdpályákhoz, mint fizikai elemhez történő vonatkoztatás, illetve ilyen mérésekkel történő hálózati kapcsolás.

Teret nyertek a műholdalapú megoldások, amihez működtetik az űrszegmenseket, fenntartják és folyamatosan alakítják a földi ellenőrző, vezérlő és szolgáltató szegmenseket és a felhasználók ráállnak a sok szempontból kedvezőbb műholdas módszerekre. Kialakulnak a kisszámú, de minden mérési technikával együttesen működtetett, gazdag térbeli és fizikai alapokat biztosító, s a korábbiaknál talán olcsóbb, de mindenképpen fenntarthatóbb integrált geodéziai hálózatok.

A felhasználók köre kiszélesedik minden szektorban, amelyek a helyfüggő információk gyűjtése, kezelése és felhasználása tekintetében érintettek.

A térinformatikai ipar és az űripar rááll

- az űr- és földi kontrolszegmensek eszközeinek mindig megújuló gyártására,
- a műholdas vevőberendezések, helymeghatározó eszközök földi sokféleségének a gyártására,
- és az ilyen eszközök segítségével történő téradatgyűjtésre, téradat- és információmegosztásra.

A piac kinövi magát, nyereséget termel. E rendszerek a gazdasági és társadalmi fejlődés, a tudomány, a földmegfigyelő rendszerek működőképés alapeszközévé, a fenntartható fejlődés céljainak a megvalósítása során a téradatok és térszempontok monitorozó, hiteles eszközévé válnak.

## Köszönetnyilvánítás

E cikk szerzőjeként, a kozmikus geodéziában hosszú éveken át kutató-fejlesztő tevékenységet folytató szakemberként és a FÖMI egykori vezetőjeként (2010-ig) élek a köszönetnyilvánítás lehetőségével az előzőekben leírtakon túl és az alábbiak szerint.

Köszönetemet fejezem ki Joó Istvánnak (Hidashollós, 1928 – Székesfehérvár, 2007), aki az Állami Földmérés műszaki vezetőjeként jó időben, jól kidolgozott szakpolitikai elképzelésekkel és kitartással megteremtette az anyagi, szervezeti és szakmai feltételeket a kozmikus geodézia hazai létrehozásához, és mindvégig támogatta az eredmények geodéziai hálózati hasznosítását.

Külön tisztelet és köszönet illeti Almár Ivánt, a KGO első vezetőjét, aki szakmai tudással és körültekintő tudományszervezéssel, interdiszciplináris szemlélettel érvényesítve szervezte meg a szakmai gárdát; a KGO-t széleskörű hazai és nemzetközi kapcsolatok útjára terelte, és tudományos eredményeihez maga is hozzájárult. Iskolát teremtett.

Az Űrkutatási Kormánybizottság, majd a MŰI éveken át támogatásban részesítette a KGO-t mint a kézzelfogható űrkutatási eredményeket folyamatosan felmutatni képes területet. Köszönet illeti őket ezért a gondoskodásért.

A KGO-ból pályázó kollegáim számos támogatást nyertek az EU programjaiban, és az ESA fejlesztési forrásaiból. Ezekért a támogatásokért is köszönet jár.

Az OMFB külön projektben, az OTKA és az MTA sok alkalommal támogatással járult hozzá a kozmikus geodéziai fejlesztésekhez. Köszönet illeti őket minden projektgazdánk részéről.

A magyarországi kutatóhelyekkel folytatott együttműködéseink

gazdagították kozmikus geodéziai eredményeinket. Kiemelem a BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszékét, a NYME Székesfehérvári GEO-t, az ELTE Űrkutatási Tanszékét, illetve ezeknek a tanszéknek az elődjait és az MTA Geodéziai és Geofizikai Kutató Intézetet.

Sokoldalúnak és kiemelkedőnek tartom az MTA támogatásból működő BME Fizikai Geodézia és Geodinamikai Kutatócsoport tevékenységét (a 2007–2011 közötti, évenkénti eredményei a <http://mta.hu/hatteranyagok/az-mta-kutatohelyeinek-eredmenyei-105499> honlapról kiindulva érhetőek el), és az ehhez kapcsolódóan kötött BME-FÖMI közös kutatóhelyi együttműködési megállapodást, amelyet annak idején a Kutatócsoport részéről annak vezetője, Ádám József, a FÖMI részéről pedig jómagam írtuk alá, mindkét fél számára előnyös feltételekkel. Örömmel állapítom meg az együttműködés eredményességét, és egyúttal köszönetemet is kifejezem a munkában résztvevőknek.

Sok sikeres program került lebonyolításra itthon és a nemzetközi szinten, és látom, hogy ilyenek ma is folyamatban vannak. Kollegáim mindegyike szép teljesítményt nyújtott. Ezen a helyen is köszönet illeti a KGO eredményes vezetőit, tudományos projektgazdáit és munkatársaikat és a FÖMI 2010 utáni vezetőit. [http://www.sgo.fomi.hu/downloads/posters/PERS\\_2016.pdf](http://www.sgo.fomi.hu/downloads/posters/PERS_2016.pdf) Eredményes munkát kívánok nekik.

## Irodalomjegyzék

- [1] Mihály, Sz.: Kozmikus geodézia és a Bajai Observatórium szerepe. III Márton Emlékülés, Baja, 2016. szept. 3.; [http://archive.galileowebcast.hu/20160903\\_ILL\\_Marton\\_Emlékülés\\_Baja/indexx.html](http://archive.galileowebcast.hu/20160903_ILL_Marton_Emlékülés_Baja/indexx.html)
- [2] Schmid, H. H.: Three-Dimensional Triangulation With Satellites. U.S. NOAA NOS, Geodesy Division, Rockville, Oct 1974; [https://docs.lib.noaa.gov/noaa\\_documents/NOS/NGS/professional%20paper/NOAA\\_PP\\_7.pdf](https://docs.lib.noaa.gov/noaa_documents/NOS/NGS/professional%20paper/NOAA_PP_7.pdf)
- [3] Lundquist, C. A. - Veis, G.: Geodetic parameters for a 1966 Smithsonian Institution Standard Earth. SAO Special Report No. 200, 1966.
- [4] Stansell, T. A.: The Navy Navigation Satellite System : Description And Status. U.S. ION, Navigation vol. 15., No. 3., 1968; <https://www.ion.org/publications/browse.cfm?year=1968&vol=15>

- [5] Petit, G. – Luzum, B. (eds.): IERS Conventions (2010), Chapter 2 Conventional celestial reference system and frame. IERS Technical Note; No. 36, BKG, Frankfurt, Germany, 2010; <http://iers-conventions.obspm.fr/2010officialinfo.php>
- [6] Cannon, W.: Overview of VLBI. IVS 1999 Annual Report; <https://ivscc.gsfc.nasa.gov/publications/ar1999/front-over/>
- [7] Noll, C. – Pearlman, M.: International Laser Ranging Service, 2009–2010 Report; <https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/about/reports/annualrpts/>
- [8] Chapront, J. – Francou G.: Lunar Laser Ranging: measurements, analysis and contribution to the reference systems. IERS Technical Note No. 34, BKG, Frankfurt, Germany, 2006; <https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn34.html?nn=94912>
- [9] IGS 2017, International GNSS Service; <http://www.igs.org/about>
- [10] IDS 2017, International DORIS Service, DORIS System; <http://ids-doris.org/>
- [11] Greneczy, Gy.: Műholdradar Interferometria; <http://www.sgo.fomi.hu/InSAR/index.html>
- [12] Mihály, Sz.: SADOSA Program System: I. Mathematical Description, II. Programming Documentation, III. Operators Manual. Monography, FÖMI SGO. Preprint, Budapest, 1985.
- [13] Mihály, Sz. – Borza, T. – Fejes, I.: Interferometric Processing of NNSS Doppler Observations. 1st International Symposium on Precise Positioning with the GPS, Rockville, April 15–19, 1985 pp. 495–508, [https://archive.org/details/positi\\_oningwith00inte](https://archive.org/details/positi_oningwith00inte)
- [14] Borza, T.: Opredelenie koordinat stanciy Riga i Zvenigorod metodom Fotodoppler. Nablyudeniya ISZ, No. 21, Tom 2. Moskva, 1984.
- [15] Brunell, R. D. – Malla, R. – Fejes, I. – Mihály, Sz.: Recent Satellite Processing Software Improvements at JMR. 3rd International Symposium on Satellite Doppler Positioning, Las Cruces, USA, 1982.
- [16] Mihály, Sz.: A magyar hálózatban 1982-ben végzett doppleres mérések feldolgozása. Geodézia és Kartográfia 1984/5. szám pp. 319–328
- [17] Ádám, J.: Geodéziai alaphálózatunk vizsgálata doppleres műhold-megfigyelések alapján. Geodézia és Kartográfia, 1984/5. szám pp. 328–339.
- [18] Ádám, J.: A pencki doppleres állomáskoordináták legkisebb négyzetes spektrálanalízise. Geodézia és Kartográfia, 1984/3. szám pp. 153–160.
- [19] Rinner, K. –, Pesec, P.: West-East European Doppler Observation Campaign. Manuscripta Geodaetica, Vol. 7, 1982.
- [20] Pesec, P. – Rinner, K. – Mihály, Sz. – Alpár, Gy.: West-East European Doppler Observation Campaign WEDOC-2. Final Results. Monography. FÖMI Tudományos Közlemények 1985. november.
- [21] Mihály, Sz.: Geodetical Use of Doppler Satellite Positioning in Frame of Intercosmos and Geodetical Surveys. Federal Scientific and Technical Conference, USSR, MIIGAiK, Moscow, Oct 1987.; FÖMI SGO, Preprint No. 8, 1987.
- [22] Rezultati obrabotki seansov dopplerovskih nabludeniy DOC-84 i DOC-87 programnim kompleksom OCHOM. Geodezicheskaya Sluzhba SSSR, CNIIGAiK, Moskva, 1991.
- [23] Czobor, Á. – Ádám, J. – Mihály, Sz. – Parm, T. – Ollikainen, M.: Results of the Finnish-Hungarian Doppler Observation Campaign (FHDOC). FGI Reports 1987 No. 1.; <http://www.fgi.fi/fgi/node/760>
- [24] Mihály, Sz.: A GPS a geodéziai gyakorlatban. 8. Kozmikus geodéziai szeminárium, Budapest, 1987.
- [25] Borza, T. – Mihály, Sz. – Husti, G. J.: Az első GPS hálózati mérés Magyarországon. Geodézia és Kartográfia, 1989/6. szám pp. 405–413
- [26] Borza, T. – Fejes, I. – Mihály, Sz.: Bevezetés a GPS technikába, Első kiadás. FÖMI SGO, Penc, 1989.
- [27] Mihály, Sz.: Szakmai megegyezés a magyar felsőrendű geodéziai hálózat GPS szemléletű továbbfejlesztéséről. Geodézia és Kartográfia, 1993/3. szám pp. 137–141.
- [28] Akadémiai Értesítő 1993/5. szám, Adományozás
- [29] Borza, T.: Elkészült az országos GPS-hálózat. Geodézia és Kartográfia, 1998/1. szám pp. 8–13.
- [30] Kenyeres, A.: A geoid hosszúhullámú komponense a Stokes-integrál módosítási eljárásaiban és a GPS-gravimetria geoidban. PhD-értekezés, BME Általános és Felsőgeodézia Tanszék, 2001.
- [31] Kenyeres, A.: A GNSS szerepe a magasságmeghatározásban. GPS25 Konferencia, 2015.
- [32] Mihály, Sz.: Az EOMA jelenlegi helyzete és várható jövője. MTA Geodéziai Tudományos Bizottság ülésén elhangzott előadás, Sopron, 2006. okt. 26.
- [33] Mihály, Sz. – Kenyeres, A. – Papp, G. – Busics, Gy. – Csapó, G. – Tóth, G.: Az EOMA modernizációja. Geodézia és Kartográfia, 2008/7. szám pp. 3–10.
- [34] Fejes, I. – Almár, I. – Ádám, J. – Mihály, Sz.: Space VLBI: Potential Applications in Geodynamics. Advanced Space Research, No. 6. pp. 205–209, 1986.
- [35] Ádám, J.: Az űr-VLBI mérések matematikai-geodéziai modelljének részletes szerkezeti vizsgálata. Geodézia és Kartográfia, 1990/6. szám, pp. 426–433.
- [36] Fejes, I. – Kawaguchi, N. – Mihály, Sz.: Space VLBI: background of an experiment proposal. Astrophysics and Space Science, 1996, vol. 239, No 2. pp. 275–280.
- [37] Frey, S.: Kozmikus geodézia, de nem műholdas – mi az? A KGO 40 Konferencia, Budapest, 2017.
- [38] WGS84, World Geodetic System 1984; <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/>
- [39] Euref, European Geodetic Reference Systems; [http://www.euref.eu/euref\\_ehrs.html](http://www.euref.eu/euref_ehrs.html)
- [40] Transformation Parameters from ITRF2014 to ITRF2008; [http://itrf.ign.fr/ITRF\\_solutions/2014/tp\\_14-08.php](http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/tp_14-08.php)
- [41] Folkner, W. M. Williams, J. G. – Boggs, D. H. – Park, R. S. – Kuchynka, P.: The Planetary and Lunar Ephemerides DE430 and DE431. IPN Progress Report pp. 42–196, Feb 15 2014; <https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/docs/2014/196C.pdf>
- [42] Kenyeres, A.: Az első hazai permanens állomástól az aktív GNSS hálózatig. GPS25 Konferencia, 2015.
- [43] GNSS Market Report, Issue 4, 2015; [https://www.gsa.europa.eu/system/files/reports/GNSS-Market-Report-2015-issue4\\_0.pdf](https://www.gsa.europa.eu/system/files/reports/GNSS-Market-Report-2015-issue4_0.pdf)

## Summary

### Milestones and Results of Space Geodesy Utilization

Space geodesy became an element of the high technology and servicing the society. In Hungary, the Satellite Geodetic Observatory (SGO) of Institute of Geodesy, Cartography and Remote Sensing (FÖMI) was joining this procedure already in 1972.

Having been an SGO fellow and later, until 2010 the FÖMI director general, the author gives a list on the space research and institutional milestones effecting the profession. Tasks, utilization areas and observational techniques and systems of space geodesy are presented. Some notable and well-specified methods and results of the least 50 years are described.

In retrospectives, the Baja Observatory and its director Márton Ill activities are appreciated as playing role in supervening of the Hungarian satellite geodetic observation practice.

Milestones and results of SGO's activity are given with special emphases on their achievements and mainly international relations in the field of the NNSS Doppler observations, the GPS developments and its introduction in the Hungarian geodetic networks and geodynamic applications including the common use of height determination and geoid data, and the formation of the integrated geodetic network. Specific SGO contributions to space-VLBI and beneficial utilization of InSAR methods are described as well.

The paper gives international overview on high accuracy, uniformity and effectiveness of the global reference systems and frameworks.

International and domestic GNSS market trends and trading achievements are also enumerated.



**Dr. Mihály Szabolcs PhD**  
c. egyetemi tanár

e-mail: [mihaly.szabolcs43@gmail.com](mailto:mihaly.szabolcs43@gmail.com)