

1. előadás:

## **A navigációs műholdrendszerek fontosabb jellemzői. A műholdas helymeghatározás fejlődéstörténete.**

### **1.1 Bevezetés**

Napjainkban egyre inkább felértékelődik a helyhez kapcsolt információk szerepe. Ilyen információk a leggyorsabban és a legszélesebb körben a műholdas helymeghatározás és navigáció mérési eljárásaival nyerhetők. A műholdas helymeghatározásra és navigációra (azaz helyzet-, sebesség- és időinformációk szolgáltatására) napjainkban világszerte az amerikai globális helymeghatározó rendszert (Global Positioning System, GPS) alkalmazzák legelterjedtebben. A rendszer első kísérleti műholdját 1978-ban, az első operatív (működő) műholdat pedig 1989-ben lőtték fel. A rendszer a kezdeti működési képességét 1993-ban érte el, a teljeset 1995-ben.

A GPS rendszer elődje az amerikai tengerészeti navigációs műholdrendszer (US Navy Navigation Satellite System, NNSS) volt, amely az 1960-as évek közepétől több évtizeden át (az 1990-es évek elejéig) működött. Az ún. Doppler-adóval ellátott mesterséges holdakat eredetileg katonai navigációs célra lőtték fel, de 1967 óta polgári navigációs célokra is rendelkezésre bocsátották. Az NNSS holdakat másképpen ún. *Transit* vagy Doppler-holdak (illetve doppleres műholdak) néven is használták. A navigációs rendszernek hat üzemelő műholdja volt, amelyek egy-egy kör alakú poláris pályán, a földfelszín felett kb. 1000 km magasságban keringtek (*1a. ábra*). Az 1970-es évek második felében az akkori pontossági szintnek megfelelő, geodéziai célú, terepi mérésekre alkalmas, hordozható Doppler-vevőberendezéseket fejlesztettek ki, melyekből hazánk is beszerzett négy vevőberendezést (1 db CMA és 3 db JMR). Ezeket geodéziai alaphálózatunk továbbfejlesztése (és a GPS-technika hazai bevezetése) céljából felhasználtuk.

Megjegyezzük, hogy az amerikai *Transit* műholdrendszer (NNSS) első működő holdját, a *Transit-1B* műholdat 1960. április 13-án lőtték fel. Ezt az időpontot tekintjük a *műholdas helymeghatározás* megszületésének, amely óta több, mint 50 év telt el. Az NNSS navigációs műholdrendszert az 1990-es évek elejéig használták.

### **1.2 A GNSS/RNSS rendszerek kifejlesztése**

Az elmúlt másfél évtizedben tanúi voltunk a GPS-technika egyre szélesebb körű alkalmazásának (Magyarországon is), nemcsak a geodézia, a térképészet, a navigáció és a térinformatika, hanem a föld- és műszaki tudományok más területein is. Az előrejelzések szerint a felhasználók köre a jövőben is egyre bővülni fog. Ezt az is lehetővé teszi, hogy a jelenlegi GPS-rendszer nagy arányú továbbfejlesztésével foglalkoznak, amelynek célja az, hogy a rendszert a tengerhajózás, a repülés (különösen a polgári repülés) és az űrkutatás igen sok területén megbízhatóan és hatékonyan lehessen alkalmazni. Így a műholdas navigációs rendszerek új, a jelenleginél is összetettebb változatait hozzák létre. E rendszerek összefoglaló megnevezésére alkalmazzák a *globális navigációs műholdrendszer* (Global Navigation Satellite System, GNSS) elnevezést.

A GPS rendszer bővítését és hatékonyságának növelését szolgálják az ún. *regionális navigációs műholdrendszerek* (Regional Navigation Satellite Systems, RNSS) kifejlesztése.

A már működő (de még fejlesztés alatt álló) és tervezett GNSS és RNSS rendszerek elnevezéseit az *I. táblázat* tartalmazza. A GNSS és RNSS fejlesztési programok valójában nemzeti infrastruktúra projektekként valósulnak meg. Nagyobb gazdasági és űrkutatási potenciállal rendelkező nemzetek részéről jól látható tendencia mutatkozik arra, hogy saját műholdas navigációs (globális és/vagy regionális) rendszert hozzanak létre. (E nemzetek többnyire saját űriparral és nukleáris technikával is rendelkeznek).

### 1.3 A GNSS rendszerek főbb jellemzői

Az elmúlt évtized elején az USA globális helymeghatározó rendszere (GPS) volt az egyetlen működő globális navigációs műholdrendszer (GNSS). Ma azonban a GPS már nem az egyetlen műholdas navigációs rendszer, mert Oroszország jelentős fejlesztéseknek köszönhetően működteti saját rendszerét GLONASS néven. Oroszország hosszú utat járt be a GLONASS újrakezítésében és modernizálásában. Az utóbbi években a rendszer műholdjainak száma megkétszereződött. Végre jóváhagyták Európa GALILEO elnevezésű műholdas navigációs rendszerét, amelynek kifejlesztésén az Európai Unió (EU) az Európai Űrügynökséggel (ESA) együtt dolgozik. Az elmúlt években kísérleti céllal fellőtték a GALILEO első holdjait. Továbbá a GPS-hez különböző kiegészítő rendszereket hoznak létre. E rendszerek összefoglaló megnevezésére használják a globális navigációs műholdrendszer (Global Navigation Satellite System, GNSS) elnevezést. Az említett műholdas navigációs rendszereken felül újabb rendszereket is terveznek. Kína bejelentette terveit a saját fejlesztésű és tulajdonú COMPASS elnevezésű GNSS létrehozására. Néhány holdat már fel is lőttek. India is létre kívánja hozni saját globális (GINSS) és regionális navigációs műholdrendszerét (IRNSS). Ez az oka annak, hogy a szakirodalomban a korábban általánosan ismert GPS elnevezés mellett napjainkban a GNSS kifejezés alkalmazása terjed el (Magyarországon is).

A GNSS betűszót 1991-ben alkották meg és alkalmazták először a 10. légi navigációs konferencián, amikor a Nemzetközi Polgári Repülésügyi Szervezet (International Civil Aviation Organization, ICAO) felismerte, hogy az elsődleges navigációs rendszert a 21. században a globális navigációs műholdrendszer (GNSS) fogja biztosítani. Ez alatt azt is értjük, hogy a GNSS kifejezésének többet kell magában foglalnia mint pusztán műholdas helymeghatározás. A pontosság mellett további olyan fontos jellemzők is kell hogy meghatározzák a rendszert, mint az integritás, a hozzáférhetőség és a folyamatos szolgáltatás. A GPS és a GLONASS, amelyek elsősorban katonai rendszerek, valójában nem biztosítják ezeket a képességeket. A GNSS teljes körű kiépítését ezért több lépcsőben biztosítják.

A GNSS betűszó használata nem egységes a nemzetközi szakirodalomban. A szakemberek többsége a globális navigációs műholdrendszerek (global navigation satellite systems) kifejezés rövidítésére alkalmazza, melyben a hangsúly a többes számként szereplő rendszerek (systems) szón van. A szakemberek egy másik (kisebbségi része, pl. *Hein és társai, 2007*) és az *Inside GNSS* folyóirat, a szóban forgó rendszerek miatt a betűszóban is többes számot használ a következő módon: GNSSes (vagy pl. GNSSs). A rendszer (system) szó többes számú alakja, a rendszerek (systems) kifejezés jól megindokolható azzal, hogy ma már ténylegesen is több rendszer működik (pl. GPS és a GLONASS) és továbbiak kifejlesztése is napjainkban folyik (az európai GALILEO, a kínai COMPASS és az indiai GINSS), amelyek mindegyike valójában egy-egy globális navigációs műholdrendszer (global navigation satellite system, GNSS.)

Ezt a kérdéskört érintik *Hofmann-Wellenhof és társai (2008)* a legújabb szakkönyvük előszavában, amelyben idézik az ENSZ CoUPOS (Committee on the Peaceful Uses of Outer Space) szervezete egyik konferenciája 1998-ban megjelent kiadványában közzétett fogalmi meghatározást. E szerint a globális navigációs műholdrendszer (Global Navigation Satellite System, GNSS) űralapú (space-based) rádiós helymeghatározó rendszer, amely magában foglal egy vagy több műholdrendszert, és ha szükséges, kiegészítő rendszereket annak érdekében, hogy a megkívánt működést szolgálják, azaz biztosítsák a folyamatos (24-hour) háromdimenziójú helyzet-, sebesség- és időinformációt a megfelelő vevőberendezéssel rendelkező felhasználó számára, legyen az a földfelszín bármely pontján, vagy a földfelszín közelében (gyakran a Föld körüli térségben). Ilyen értelmezésben alkalmazza a GNSS kifejezést *Hofmann-Wellenhof és társai (2008)*, továbbá a hazai szakirodalomban *Fejes (2003)*, *Borza (2004)* és *Ádám, (2007)*, valamint *Ádám és társai (2004)*.

A GPS rendszer mérési technikájából és a vele történő helymeghatározás sajátos módszeréből adódóan nagy számú műhold üzemel a földfelszín felett ún. közepes magasságú pályákon (Mean Earth Orbit, MEO). Ez a GNSS többi rendszerére (GLONASS, GALILEO és COMPASS) is jellemző. A GNSS rendszerek műholdjai héjszerűen helyezkednek el a térben, a Föld felszíne felett 19000 km és 23000 km magasságban (*II. táblázat*). A GPS rendszer műholdjai mintegy 20000 km földfelszín feletti magasságban (*1b. ábra*), 6, közel körpályán helyezkednek el (*2. ábra*). A GPS rendszer modernizálása folyamatban van, tervbe vett továbbfejlesztése 2015-ig tart.

A GLONASS rendszert is egyaránt katonai és polgári alkalmazások céljából fejlesztik. A rendszer teljes kiépítettségben 24 műholdból áll, amelyek a földfelszín felett 19100 km magasságban, 3 körpályán egyenletesen elosztva keringenek. A három MEO-műholdpálya síkja egymással 120°-os szöget zárnak be. Oroszország a GLONASS működőképességét ugyanolyan szintre kívánja fejleszteni, mint a GPS és a GALILEO.

A GALILEO rendszert az Európai Unió (EU) és az Európai Űrügynökség (ESA) közös fejlesztésében hozza létre kizárólag polgári (civil) felhasználásra. Teljes kiépítettségében 30 (27+3 tartalék) műholdból fog állni, melyeket 3 kör alakú pályán helyeznek el egyenletesen elosztva, a földfelszín felett mintegy 23000 km magasságban. Kísérleti céllal már több mesterséges holdat fellöttek, a navigációs műholdrendszer előreláthatólag 2015-re épül ki.

A COMPASS rendszert Kína hozza létre katonai és polgári alkalmazásokra. Már több kísérleti műholdat fellöttek. A tervezet szerint a teljes rendszer 2012-ben kezdi meg működését.

## 1.4 Az RNSS rendszerek főbb jellemzői

Az RNSS rendszerek lényegében a GPS bővítését szolgálják egy-egy régió térségében. Jelenlegi ismereteink szerint három RNSS rendszer létrehozásáról van szó: India, Japán és Kína határozta el, hogy térségükben a GPS rendszer hatékonyságának növelésére és bővítésére hozza létre saját RNSS rendszerét. Ebből a célból navigációs műholdakat bocsátanak fel ún. geoszinkron (GSO) pályákra. Ezek a pályák kitüntetett szerepet játszanak a műholdpályák között, mert ezeken a keringés ideje és iránya pontosan megegyezik a Föld sziderikus (állócsillagokhoz képest mért) tengelyforgási idejével és irányával. (A geoszinkron pályán keringő mesterséges égitestet geoszinkron műholdnak nevezzük..) A geoszinkron műhold keringésének jellegzetessége, hogy adott helyi időben egy ideig minden nap pontosan

ugyanazon földrajzi hely fölött tartózkodik. A geoszinkron pálya speciális esete a geoszinkron körpálya, ennek földfelszín feletti magassága 35790 km ( $a = 42164$  km). A pálya bármely pontjából a Föld felszínének 42 %-a figyelhető meg róla egyszerre. A Földről nézve a geoszinkron műholdak É-D-i irányú, a pályahajlás ( $i$ ) szögétől függő, nyolcas alakú útvonalat írnak le (*3a. ábra*).

További speciális eset, ha a pályahajlás szöge  $0^\circ$ , azaz a műhold az Egyenlítő síkjában kering. Ebben az esetben a műhold keringése során mindvégig a Föld felszínének ugyanazon pontja fölött tartózkodik. Az ilyen pályán keringő, a Föld felszínéhez képest álló műholdat geostacionárius műholdnak, a műholdpályát pedig geostacionárius (GEO) pályának nevezzük (*3b. és c. ábra*).

A tervezett RNSS rendszerek közül a japán QZSS már a megvalósítás fázisában van. A 3 geoszinkron műhold közül már egyet ez év nyarán felbocsátottak. Mivel pályája eltér a körpályától, ezért a pálya szubsatellita vonala a *4b. ábrán* látható sajátos nyolcas alakot alakítja ki.

## 1.5 Kiegészítő rendszerek

A GPS azonban még mindig nem alkalmazható kellő biztonsággal bizonyos navigációs feladatokhoz, amelynek egyik legfontosabb oka az, hogy a rendszer önellenőrző képessége (integritása) egyelőre elmarad a szigorú közlekedésbiztonsági előírásokhoz képest. A nagyobb helymeghatározási pontosság elérése céljából hozták létre az ún. kiegészítő rendszereket (Augmentation System). A kiegészítő rendszerek két típusát különböztetjük meg aszerint, hogy a szolgáltatások elérése műholdakon keresztül (Satellite Based Augmentation System, SBAS) vagy valamely földi kommunikációs csatornán (Ground Based Augmentation System, GBAS) valósul meg. A kiegészítő rendszerek lényegében két szolgáltatást nyújtanak: egyrészt fokozzák a GPS-szel elérhető abszolút helymeghatározás pontosságát, másrészt információt szolgáltatnak a rendszer megbízhatóságáról és biztonságáról. Több ilyen rendszer kezdte meg működését az elmúlt években (*III. táblázat*). A WAAS Észak-Amerika, az MSAS Japán, a GAGAN India, az EGNOS rendszer pedig Európa területére biztosítja az említett szolgáltatásokat. Lényegében a polgári légi irányítást és navigációt kell segíteniük. A kiegészítő rendszerek valamennyi műholdja ún. geostacionárius (GEO) pályán kering.

## 1.6 A GNSS Nemzetközi Bizottságának szerepe és tevékenysége

A 2000-es évek elején az ENSZ keretei között létrehozták a GNSS Nemzetközi Bizottságot (International Committee on Global Navigation Satellite Systems, ICG, <http://www.oosa.unvienna.org/oosa/SAP/gnss/icg.html>) a GNSS infrastruktúra globális méretű használatának és a kapcsolódó ismeretek cseréjének elősegítése céljából.

Az ICG keretei között a jelenlegi és a tervezett GNSS rendszert szolgáltatók megegyeztek három fontos alapelvben, amelyek segítenek azt biztosítani, hogy tisztességes verseny alakuljon ki. Ez a három rendező elv a következő:

- a) összeegyeztetés (compatibility),
- b) kölcsönös működőképesség (interoperability), és az
- c) átlátszóság (transparency).

Az ICG ezeket a következőképpen értelmezi.

A GNSS rendszerek összeegyeztethetősége azt kívánja meg, hogy az egyes GNSS rendszerek jelei között ne lépjen fel interferencia, továbbá az egyes rendszerek által nyújtott, biztonsági célokat szolgáló, korlátozott hozzáférésű jelek átfedését elkerüljék (a rendszerszolgáltatók az ilyen jelek átfedésének elkerülésére törekszenek).

A kölcsönös működőképesség azt jelenti, hogy az egyes GNSS rendszerek jelei használhatók együttesen olyan módon, hogy az általános szolgáltatás javuljon. Minél könnyebb lesz több GNSS rendszer adásait venni képes vevőberendezést kifejleszteni és legyártani (ún. multi-GNSS vevőberendezések), akkor annál inkább fenn fog állni két és több GNSS rendszer között a kölcsönös működőképesség. Másképpen fogalmazva a kölcsönös működőképesség (interoperability) alatt azt értjük, hogy az L1 és L5 frekvenciákat és ezeken a frekvenciákon modulált CDMA típusú jeleket valamennyi GNSS és RNSS biztosítani fogja. Végeredményben a mutatkozó verseny haszna alacsony költségű, kétfrekvenciás ún. multi-GNSS vevőberendezések kifejlesztésében nyilvánul meg, amelyek kivitelezésében is lényegesen magasabb minőségűek lesznek a jelenlegi GPS-vevőberendezéseknél. Ez a felhasználók javát szolgálja.

Végül az átlátszóság a GNSS rendszerek jeleinek szolgáltatásában azt kívánja meg, hogy a szolgáltatók tegyék közzé mindazon dokumentumokat, amelyek leírják a jel- és rendszerinformációt, a szolgáltatás elveit és minimális kritériumait. Más szavakkal ez azt jelenti, hogy mindazt az információt tegyék nyilvánossá (elérhetővé), melyekre a műszergyártóknak szükségük van ilyen vevőberendezések készítéséhez, továbbá a szolgáltatók elegendő ismereteket nyújtsanak a felhasználóknak arról, hogy milyen minőségű szolgáltatást várhatnak el.

Az ICG évente ülésezik abból a célból, hogy támogassa az űralapú navigációs és helymeghatározó rendszerekhez történő általános hozzáférést és közöttük az összeegyeztethetőséget, kölcsönös működőképességet. Az ICG első konferenciáját 2006. november 1-2. között szervezték meg Bécsben, az ötödiket pedig ez elmúlt évben rendezték meg (Turin, Olaszország, 2010. október 17-22; <http://www.icg2010.org>).

Az ICG végső célja a GNSS rendszerek átfogó hálózatának (GNSS system of systems, a GNSS rendszerek rendszerének) kiépítése, melyet az ICG a különböző GNSS rendszereket működtetők közötti együttműködés révén a navigációs rendszerek harmonizálása alapján és a felhasználói közösség igényeinek figyelembe vételével érhet el.

## 1.7 Összefoglalás

A GNSS/RNSS rendszerek fejlesztésében napjainkban kétségtelenül verseny folyik, amely jótékony hatással van az innovációra. Ez a verseny minden bizonnyal nemzetközi szabályozást igényel. A műholdas navigációs rendszereket kifejlesztő országokban kiemelt figyelmet kap és nagy fontosságú a földrajzi helyhez kötött információk (geospatial information) szolgáltatása, mely nemzetközi szinten is stratégiai fontosságú. Ebben a kiemelt fejlesztési irányzatban az űralapú PNT (Positioning, Navigation and Time) - adatok megbízható és folyamatos szolgáltatása (Space-Based PNT service) a GNSS/RNSS rendszereket a szóban forgó szolgáltatás szükséges elemeivé teszik. Ezért az elkövetkezendő évtizedben fontos K+F+I-tevékenység területe lesz a GNSS/RNSS rendszerek átfogó

hálózatának létrehozása és annak vizsgálata, hogy mit jelent majd ez a felhasználók, a vevőberendezéseket előállítók és a navigációs adatokat szolgáltatók számára.

A GNSS/RNSS rendszerek átfogó hálózata, mely fokozatosan megvalósul, kétségtelenül a Nemzetközi Geodéziai Szövetség (IAG) globális geodéziai megfigyelőrendszerének (GGOS) egy rendkívül fontos elemét fogja képezni.

*(Az előadás keretében bemutatásra kerülő időszerű ábrákat az előadási tanórán osztjuk ki.)*

Sz.	Betűszó	A navigációs műholdrendszer elnevezése és honlapja
1.	GPS	NAVSTAR Global Positioning System, Globális helymeghatározó rendszer (amerikai) <a href="http://tycho.usno.navy.mil/gps.html">http://tycho.usno.navy.mil/gps.html</a>
2.	GLONASS	GLObal NAVigation Satellite System (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) Globális navigációs műholdrendszer (szovjet-orosz) <a href="http://www.glonass-ianc.rsa.ru/pls/htmldb">http://www.glonass-ianc.rsa.ru/pls/htmldb</a>
3.	GALILEO	European Satellite Positioning and Navigation System, európai műholdas helymeghatározó és navigációs rendszer <a href="http://www.esa.int/esaNa/galileo.html">http://www.esa.int/esaNa/galileo.html</a>
4.	BeiDou-2/ COMPASS	Kína globális navigációs műholdrendszere
5.	GINSS	Global Indian Navigation Satellite System India globális navigációs műholdrendszere
6.	BeiDou-1/ CAPS	Chinese Area Positioning System Kína regionális helymeghatározó rendszere
7.	QZSS	Quasi-Zenith Satellite System Japán kvázi-zenitális műholdrendszere
8.	IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System India rádió navigációs műholdrendszere
9.	EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service, európai műholdas navigációs kiegészítő szolgáltatás <a href="http://www.egnos-pro.esa.int/index.html">http://www.egnos-pro.esa.int/index.html</a>
10.	WAAS	Wide Area Augmentation System of the USA amerikai műholdas navigációs kiegészítő szolgáltatás <a href="http://gps.faa.gov/Programs/WAAS.htm">http://gps.faa.gov/Programs/WAAS.htm</a>
11.	MSAS	Multifunctional Transport Satellite (MTSAT) Satellite-based Augmentation System of Japan, japán műholdas navigációs kiegészítő szolgáltatás: <a href="http://www.mlit.go.jp/koku/ats/e/mtsats/role">http://www.mlit.go.jp/koku/ats/e/mtsats/role</a>
12.	GAGAN	GPS and Geo Augmented Navigation System of India, Indiai műholdas navigációs kiegészítő szolgáltatás
13.	SDCM	System for Differential Correction and Monitoring Oroszország műholdas navigációs kiegészítő szolgáltatása ( <a href="http://sdcem.rniikp.ru">http://sdcem.rniikp.ru</a> )
14.	SNAS	Satellite Navigation Augmentation System Kína műholdas navigációs kiegészítő szolgáltatása
15.	NIGCOMSAT	Nigerian Communications Satellite Nigériai kommunikációs műhold
16.	CWAAS	Canadian WAAS Kanadai műholdas navigációs kiegészítő szolgáltatás
17.	CSTB	Dél-Amerika műholdas navigációs kiegészítő szolgáltatása

1.1 táblázat: Navigációs műholdrendszerek

Jellemző adatok	GPS	GLONASS	GALILEO	COMPASS	QZSS	IRNSS	CAPS
Első műhold	1978.02 .22.	1982.10.12.	2005.12.28.	2007.04.14.	2010		
Teljes működés	1995.07 .17.	1996.01.18.	2012/2013 (?)	2020 (?)	2012	2013	
Műholdak száma	24 MEO +3 tartalék	24 MEO	27 MEO +3 tartalék	27 MEO, 5 GEO és 3 IGSO	3 GSO	3 GEO 4 GSO	2 GEO 4 SIGSO
Pályasíkok száma	6	3	3	3	1	3	?
Fél nagytengely hossza (km)	26559.7	25440	29601.297	27840	42164	42164	42164
Excentricitás, e	0	0	0	0	0.099	0	0
MEO-műholdak pályahajlása, i	55°	64.8°	56°	55°	-	-	-
GEO-műholdak földrajzi hosszúsága	-	-	-	58,75°, 80°, 110,5°, 140°, 160°	-	34°, 83°, 132°	59°, 163°
GSO-műholdak egyenlítői átmeneti hosszúsága	-	-	-	118°	135°	55°(2db), 112°(2db)	87.5°, 110.5°, 125°, 142°
GSO-műholdak pályahajlása	-	-	-	55°	45°	29°	7°
Geodéziai vonatkoztatási rendszer	WGS84	PE90	GTRF		JGS/ ITRF	?	?
Időrendszer	GPS-idő	GLONASS- idő	Galileo-időr.				?

1.2 táblázat: A GNSS/RNSS rendszerek főbb jellemzői



Paraméter	EGNOS	WAAS	MSAS	GAGAN	SDCM	SNAS
Műholdak típusa és száma	GEO (3)	GEO (4)	GEO (2)	GEO (3)	GEO (2)	GEO (2)
GEO műholdak földrajzi hosszúságai	15.5°W 64.0°E 21.5°E	53°W 98°W 120°W 178°W	140°E 145°E	34°E 83°E 132°E	16°W 95°E	
Félnagy tengely hossza, a (km)	42164 km	42164 km	42164 km	42164 km	42164 km	42164 km

1.3 táblázat: GNSS kiegészítő rendszerek pályajellemzői