

9. előadás: Térbeli helymeghatározás műholdrendszer (GPS) segítségével. A helymeghatározás elve, lehetőségei, pontossága A GPS észlelési módszerei. GNSS-infrastruktúra. Az eredmények beillesztése az állami földmérés rendszerébe *

A korábbi előadások során megismerkedtünk a Geodézia feladatával, amely szerint a Geodéziában a különféle természetes és mesterséges objektumok alakjelző pontjainak térbeli helyzetét kívánjuk meghatározni. Ezt a feladatot hagyományosan általában kettéválasztjuk vízszintes-, illetve magassági koordináták meghatározására. A vízszintes koordináták megadásához valamilyen vetületi koordinátarendszert használunk és a felméréndő pontok helyzetét jellemzően irányok és távolságok méréséből tudjuk levezetni. A magassági helyzet megadásához egy célszerűen kiválasztott referenciaszinthez képest definiáljuk a pontok magasságát. Ebben az esetben pontok közötti magasságkülönbségeket határozunk meg geometriai szintezéssel vagy trigonometriai magasságméréssel.

Mindkét eset közös jellemzője, hogy a vetületi koordinátarendszer tengelyeit, vagy a magasságmeghatározáshoz használt alapszintet a természetben nem jelöljük meg, a helymeghatározás során a koordinátarendszert az úgynevezett alaphálózati pontok határozzák meg számunkra.

A geodéziai alaphálózatok bemutatása során láthattuk, hogy a vízszintes-, és magassági helymeghatározás, az eltérő mérés technika mellett, elkülönült alaphálózatokat is igényel. Az alaphálózatok korábban alapvetően országokként készültek, így az eltérő koordinátarendszerek miatt az országhatárokon átnyúló műszaki, gazdasági, tudományos és nem utolsósorban katonai tevékenységeket csak nagy nehézségek árán lehetett geodéziailag összehangolni. Emiatt szükségessé vált a hálózatok összekapcsolása, azaz az országhatárokon átnyúló regionálisan, kontinentálisan vagy akár globálisan egységes alaphálózatok, és koordináta-rendszerek kialakítása.

A nagy kiterjedésű alaphálózatok elkészítésében elengedhetetlen szerepet játszottak az űrtechnika fejlődésével a különféle műholdak. Ezeket az eleinte csak passzív műholdakat (felületükön csak a Nap sugárzásának visszaverésére alkalmas tükröket helyeztek el), csupán magaspontként, jól irányozható, nagy távolságból látható pontokként használták. Manapság már az ún. aktív műholdakat használjuk geodéziai célokra. Ezek már különféle jeleket sugároznak a Föld felé, amelyek észlelésével az egész Föld felszínén meg tudjuk határozni helyzetünket.

Ilyen globális helymeghatározó rendszer az USA Védelmi Minisztériuma által fenntartott NAVSTAR GPS (Global Positioning System) műholdrendszer. Elsődleges rendeltetése a katonai célú navigáció, de bizonyos korlátozásokkal polgári célokra (a navigáció mellett helymeghatározásra) is használható.

9.1. A navigáció és a helymeghatározás

A navigáció és a helymeghatározás hasonló fogalmak, mégsem kezelhetők egymás szinonimáiként. Helymeghatározás alatt egy vonatkoztatási rendszerben egy objektum térbeli helyzetének (koordinátáinak) meghatározását értjük. Ezzel szemben a navigáció nem csak a „hol

* Az óravázlatot átdolgozta dr. Rózsa Szabolcs egyetemi docens

vagyok?” kérdésre ad választ, hanem arra is, hogy „hogyan jutok el egy adott pontba?”. A helymeghatározás esetében általában nem ragaszkodunk a koordináták azonnali, a mérés időpontjában történő meghatározásához. Navigációs eljárásoknál azonban a pontosságon túl a gyors helyzetmeghatározás, és a követendő irány gyors meghatározása is szükségeltetik.

9.2. A globális navigációs műholdrendszerek (Global Navigation Satellite Systems – GNSS)

Bár jelenleg még az amerikai NAVSTAR-GPS (röviden GPS) rendszer a legismertebb tagja a földkerekség bármely pontján elérhető műholdas navigációs szolgáltatásokat biztosító rendszereknek, meg kell említenünk, hogy már jelenleg is üzemel az orosz GLONASS rendszer, míg kiépítés alatt áll a kínai COMPASS, az európai Galileo, az indiai INNS és még számos más regionális lefedettséget biztosító műholdas rendszer. Az említett globális rendszereket összefoglaló néven globális navigációs műholdrendszereknek (GNSS) nevezzük.

Ezek a rendszerek önállóan is képesek a globális lefedettség biztosítására, de egymással kombinálva is használhatóak. A kombinált használat előnye, hogy több műholdra tudunk egyszerre észleléseket végezni, ezáltal megbízhatóbb helymeghatározást végezhetünk.

A globális navigációs műholdrendszereknek a földkerekség bármely pontján, bármely időpontban, az időjárástól függetlenül működni kell, miközben az egyidejű felhasználók száma sem korlátozható. A vizuális észlelés (és vele együtt a szög mérés, valamint az elektrooptikai távmérés) az időjárás-függetlenség követelménye miatt nem jöhet számításba. Egyedül a mikrohullámú (a deciméteres rádióhullámokat felhasználó) távmérés tűnik alkalmasnak a helymeghatározásra, így az említett rendszerek mindegyike ezt a mérési elvet alkalmazza.

Mivel korlátlan számú felhasználót kell egyidejűleg kiszolgálnia a rendszereknek, ezért a távmérést ún. egyutas módszerrel kell megvalósítani. Az egyutas módszer lényege, hogy csak a műhold sugároz jeleket a földi felhasználó felé, így a mérőjel csak egyszer teszi meg az utat a műhold és az észlelő között. Kétutas rendszerről akkor beszélünk, ha a földi észlelő sugározna egy mérőjelet a műhold felé, majd azt a műhold visszajuttatná a földi észlelő felé. Ekkor a mérőjel kétszer tenné meg a mérendő távolságot. Ha visszagondolunk az elektrooptikai távmérés témakörben tanultakra, akkor beláthatjuk, hogy az elektrooptikai távmérés ún. kétutas rendszerű távmérés.

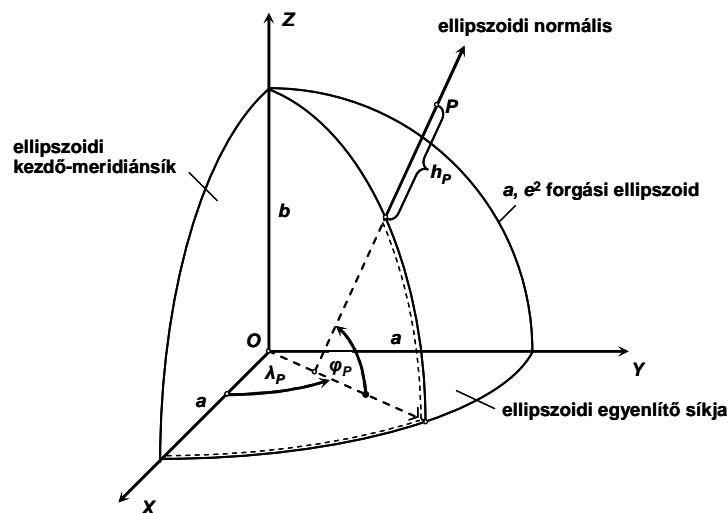
A mikrohullámú távmérés esetében a mérőjel terjedési idejét mérjük a műhold és egy földi észlelő között. Ismerve a jel terjedési sebességét – amelyről első közelítésben feltehetjük, hogy megegyezik a fény vákuumban érvényes terjedési sebességével – a mérőjel által megtett út meghatározható, ezáltal a műhold és a földi észlelő távolsága kiszámítható.

Ahhoz azonban, hogy a mérőjel terjedési idejét meg tudjuk határozni, nagyon pontosan meg kell mérnünk a jel kibocsátásának és a jel észlelésének az időpontját. Mivel egyutas rendszereknél a jel kibocsátása a műholdon történik, míg az észlelés a földfelszínen, így két különböző időmérő eszközt kell használnunk. Ennek a két időmérő eszköznek pontosan ugyanabban az időrendszerben kell járniuk, azaz ugyanabban a pillanatban ugyanazt az időpontot kell mutatniuk. Ellenkező esetben az órák igazíthatatlansága miatt időmérési hiba lép fel, amely a távmérési eredménybe tovaterjed. Könnyen belátható, hogy a pontos időmérés megvalósítása kulcsfontosságú a globális műholdas navigációs rendszerek szempontjából. Mindössze 1 ns (1 nanosec = 10^{-9} s) időmérési hiba a fény terjedési sebességének köszönhetően már 30 cm nagyságú távmérési hibát okoz.

9.3. A helymeghatározás alapelve

A globális helymeghatározás megvalósításához első lépésben egy egységes globális koordinátarendszert kell bevezetnünk. Ezt a GPS rendszer esetében WGS-84 (World Geodetic System 1984) rendszernek hívjuk. Bár a WGS-84 jóval több mint egy egyszerű koordinátarendszer, a mi szempontunkból elegendő ha csak koordinátarendszerként hivatkozunk rá. A WGS-84 koordinátarendszere egy jobbsodrású térbeli derékszögű koordinátarendszer (11-1. ábra). A koordinátarendszer kezdőpontja a Föld tömegközéppontja, Z tengelye jó közelítéssel párhuzamos a Föld forgástengelyével, az X tengelye jó közelítéssel a greenwich-i meridiánsík irányába mutat, míg az Y tengely merőleges mind az X, mind a Z tengelyekre.

A GPS rendszer esetében tehát az összes koordinátamegoldást ebben a térbeli derékszögű koordinátarendszerben kapjuk meg. Mivel a Föld tömegközéppontjához viszonyított térbeli derékszögű koordináták kevésbé informatívak, ezért a WGS-84 rendszerhez hozzárendeltek egy geocentrikus elhelyezésű forgási ellipszoidot is. Így egy tetszőleges P pont helyzetét nem csak a térbeli derékszögű koordinátarendszerben, hanem a referencia-ellipszoid felületére levetített ellipszoidi koordinátákkal (φ_P – ellipszoidi földrajzi szélesség, λ_P – ellipszoidi földrajzi hosszúság), valamint a P pont és az ellipszoid felülete közötti, az ellipszoidi normális mentén mért távolsággal (h_P – ellipszoid feletti magasság) is megadhatjuk. Az ellipszoidi koordináták nagy előnye, hogy segítségükkel már sokkal könnyebben tájékozódhatunk a földfelszínen.



11-1. ábra. Ellipszoidi földrajzi (geodéziai) koordináta-rendszer

Miután definiáltuk a globális koordinátarendszert, nézzük meg, hogy miképpen határozhatjuk meg egy földi pont koordinátáit a műholdas helymeghatározó rendszerek segítségével. A műholdas helymeghatározó rendszerek több műholdból állnak, amelyek pontos helyzete bármely időpillanatban az ismert műholdpálya-adatok alapján meghatározható. Mivel egy tetszőleges pont helyzetét három koordinátával tudjuk meghatározni, így három ismert koordinátájú műholdtól való távolságméréssel (ha a műholdak nem ugyanazon síkban találhatók) a pont koordinátáit meg is tudnánk határozni. Ez a térbeli ívmetszés¹ feladata.

¹ Megjegyezzük, hogy az ívmetszés fogalmával a Pontkapcsolások témakörben már megismertkedtünk. Ívmetszés esetén két ismert koordinátájú alapponttól történő távolságmérés felhasználásával számítottuk ki a meghatározandó pont vetületi koordinátáit.

A távolságot azonban nem közvetlenül mérjük meg, hanem időmérésre vezetjük azt vissza. Így foglalkoznunk kell az időmérő eszközök igazítottságának problémájával. A már említett nagy pontosságú időmérés megvalósításához atomórákra lenne szükségünk, ami a mérőfelszerelés árát, méretét jelentősen növelné. Emiatt csupán a műholdakra helyeznek el atomórákat, míg a földi észlelésekhez használt műholdvevő készülékekbe csupán egyszerűbb kvarcórát építenek. A kvarcórák előnye a kis méret és az alacsony ár, hátrányuk viszont a jóval egyenetlenebb órajárás, ezáltal az alacsonyabb időmérési pontosság.

Annak érdekében, hogy az órák igazítatlanságából eredő hibákat kiküszöböljük, két dolgot kell tennünk: egyrészt a műholdak atomóráinak a kisebb mértékű, és időben kevésbé változó órahibáit a műholdak a sugárzott jelben szolgáltatják, így azokat javításként figyelembe tudjuk venni. Másrészt a helymeghatározásba be kell vezetnünk egy negyedik ismeretlent is, ami nem más, mint a vevő óra igazítatlanságából eredő hiba nagysága. Így nem okoz gondot a földi vevőberendezésekbe épített kvarcóra egyenetlenebb órajárása.

Az egyértelmű helymeghatározáshoz tehát négy ismeretlent kell meghatározunk, így négy műholdra kell egyidejű távolságmérést végeznünk. Az egyidejűség követelménye amiatt fontos, mivel a vevőóra hiba időben nagymértékben változik, így meghatározott értéke csak egy-egy észlelési időpontra érvényes.

9.4. A NAVSTAR GPS helymeghatározó rendszer

A globális helymeghatározó rendszereket általában három alrendszerre tagoljuk:

- a műholdak alrendszere: ez tartalmazza a műhold-konstellációt;
- a földi követőállomások alrendszere: tartalmazza azokat a földi létesítményeket, amelyek szükségesek a rendszer működőképességéhez;
- a felhasználók alrendszere: a helymeghatározási szolgáltatást igénybevevők köre, ideértve jelek vételére, és feldolgozására alkalmas eszközöket (műholdvevőket).

9.4.1 A műholdak alrendszere

A rendszerben hat pályán az eredeti tervek szerint összesen 24 műhold kering. A jobb lefedettség és előnyösebb műholdgeometria miatt jelenleg 31 műholdból áll a GPS konstelláció. A műholdak száma és térbeli eloszlása lehetővé teszi, hogy a földkerekség bármely pontján, bármely időpontban a horizont felett egyszerre 9-11 műhold „látható”, közülük 4-7 az észlelés számára ajánlott, 15°-nál nagyobb magassági szögű irányban.

A műholdak tömege mintegy 2000 kg, keringési magasságuk 20 200 km, keringési idejük közel 12 óra. A Föld forgása miatt ugyanaz a műhold-konfiguráció 4 perc híján 24 óra múlva jelenik meg újra egy földi pont felett. Az első műholdat 1978-ban bocsátották fel, a műholdrendszert 1994-ben nyilvánították véglegesen kiépítetté. A kezdetek óta a műholdak számos generációját állították pályára. A műholdak átlagos élettartama az első években 4-5 év volt, napjainkban már 8-10 év.

9.4.1.1 A műholdak által sugárzott jelek és adatok

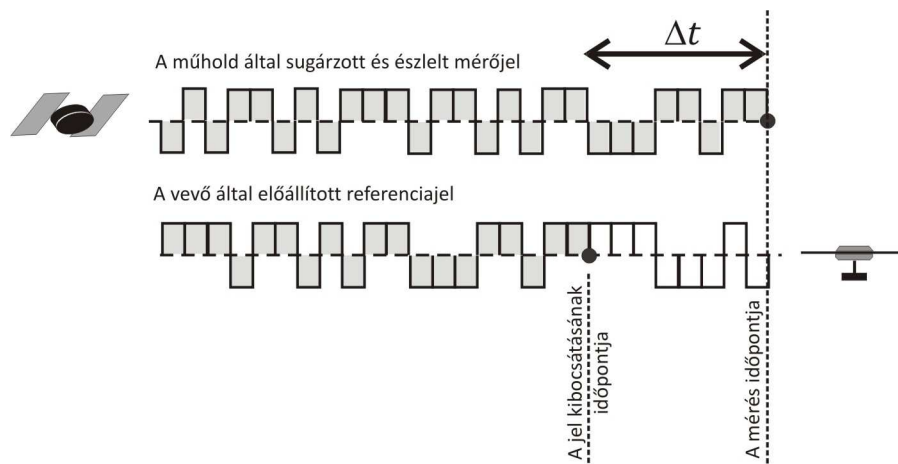
9.4.1.1.1 Mérőjelek a műhold-vevő távolság meghatározásához

A műholdak fedélzetén lévő atomórák $f_0 = 10,23$ MHz frekvenciájú alapjelet, továbbá ennek felharmonikusaként két vivőjelet állítanak elő: az L1 jel frekvenciája $f_1 = 154 f_0$, hullámhossza $\lambda_1 = 19,03$ cm; az L2 jel frekvenciája $f_2 = 120 f_0$, hullámhossza $\lambda_2 = 24,42$ cm. A két vivőfrekvencián végzett méréssel kiküszöbölhető az ionoszféra sebességmódosító hatása (lásd később).

Mivel a vivőhullám egy egyszerű szinuszhullám, így erre a kibocsátás időpontját – és egyéb információkat tartalmazó üzeneteket – ültetnek. A kibocsátás időpontját úgynevezett ál-véletlen kódok segítségével ültetik rá a vivőhullámra. Az ál-véletlen kódok +1 és -1 értékek véletlenszerűnek látszó, valójában az idő függvényében egy bonyolult matematikai képlettel leírható kódsorozatot jelentenek.

A földi vevő ismeri ezen kódok előállításának módját, így a saját vevőórája által szolgáltatott időjel alapján elő tud állítani egy referencia kódsorozatot. Ezt követően az észlelt műholdjelből leválasztott kódsorozatot összehasonlítva a referencia kódsorozattal, megállapítható a kódok időbeli elcsúszásának mértéke, ami megegyezik a jel észlelt terjedési idejével (11-2 ábra). Ezt a mérési eljárást nevezzük **kódmérésnek**. A kódmérést kétféle kóddal végezhetjük:

- ♦ a nyílt hozzáférésű C/A-kóddal: ebben az esetben egy kódérték hossza $1\mu\text{s}$ -nak felel meg. Mivel egy kódérték hosszán belül is kb. 1% pontosan tudjuk a kibocsátási időt meghatározni, ezért a távolság kb. 3 m pontossággal határozható meg. A C/A kóddal csak az L1 vivőjelet modulálják (kivéve a legújabb műholdakat);
- ♦ a nagyobb pontosságot (0,3 m) biztosító P-kódot csak a katonai felhasználók ismerik (1994-től a P-kódot a gyakorlatilag megfejthetetlen Y-kódra módosították). Ebben az esetben egy kódérték hossza $0,1\mu\text{s}$ -nak felel meg. A P kóddal mindkét vivőjelet modulálják annak érdekében, hogy a katonai felhasználók az ionoszféra hatását ki tudják küszöbölni.



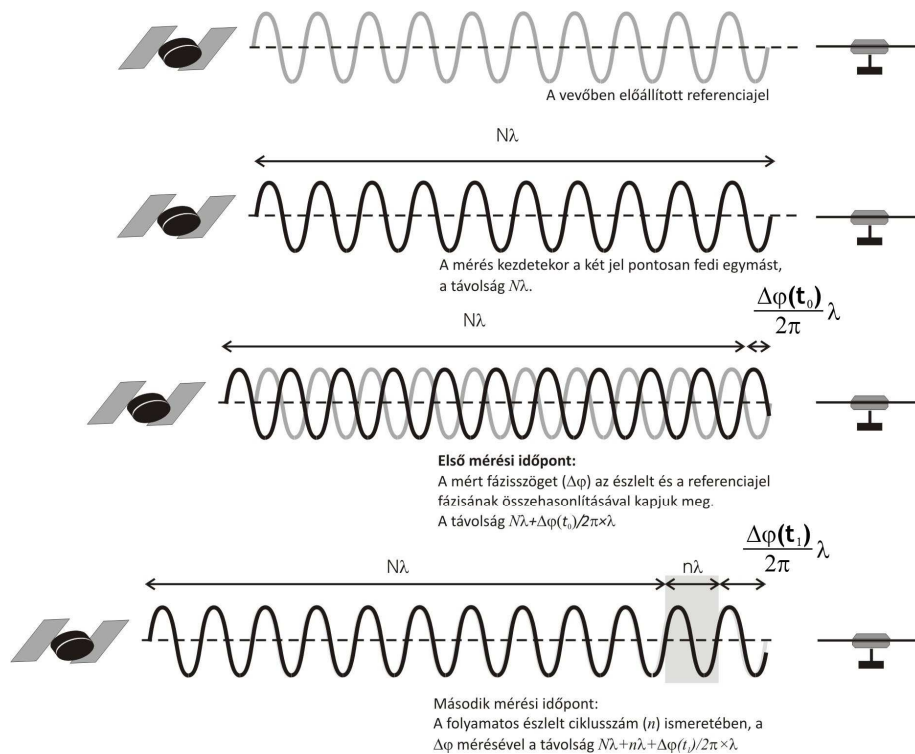
11-2. ábra. A kódmérés alapelve

Jól látható, hogy még a P-kóddal végzett távméréssel sem biztosítható a geodéziai helymeghatározáshoz szükséges centiméteres pontosság. Emiatt geodéziai célokra a műhold-vevő távolságot a vivőhullámon végzett ún. **fázisméréssel** határozzák meg az alábbiak szerint:

- ♦ a vevő előállítja a műhold szinuszos vivőjelinek másolatát, és megméri a fáziskülönbséget a műholdról érkező jel és a saját jele között;

- a fázismérés akkor kezdődik, amikor a folyamatosan változó fáziskülönbség éppen zérus; ekkor a műhold-vevő távolságon éppen egész számú hullám fér el (a hullámok N száma ismeretlen);
- a műhold-vevő távolság változása során a vevő a fáziskülönbség mérése közben az egész fázisciklusokat is számolja (n);
- a szükséges idő elteltével befejeződik a fázismérés, kiszámítható a ciklusszám egész és tört részének megfelelő távolságváltozás, majd $N\lambda$ hozzáadásával a műhold-vevő távolság. Az N ún. **ciklus-többségtelműség** továbbra is ismeretlen, annak feloldása a számítás feladata.

Vegyük észre, hogy a műhold-vevő távolság meghatározásához több időpontban végzett mérés esetén is csupán egyetlen, a kezdeti ciklus-többségtelműséget kell meghatároznunk. Így műholdanként egy-egy további ismeretlen keletkezik a korábban már említett vevőórahiba, illetve a 3 koordináta mellett. Belátható, hogy a ciklustöbbségtelműség miatt a helymeghatározás egyetlen időpontban végzett fázismérésből nem oldható meg. Mivel egy teljes hullámhossz nagyságrendileg 20 cm hosszú, és a fázismérés pontossága a hullámhossz 1%-ra tehető, így a ciklustöbbségtelműségtől eltekintve a műhold-vevő távolság 2 mm pontossággal határozható meg.



11-3. ábra. A fázismérés alapelve

Meg kell említenünk, hogy a napjainkban pályára állított GPS műholdak már további fejlesztéseket is tartalmaznak. 2006. december 16-án állt üzembe az első olyan GPS műhold, amely már az ún. L2C jelet is sugározza a felhasználók felé. Az L2C jel azt jelenti, hogy immáron az L2 vivőfázist is modulálják a C/A kóddal, ezáltal a civil felhasználók is két különböző frekvencián tudnak kódmerést végezni. Ennek nagy előnye, hogy így az ionosféra hatása jobban kezelhető.

A legújabb Block IIF jelű műholdakon ezen kívül folyamatosan bevezetésre kerül az L5 vivőfrekvencia is. Az L5 vivőjel frekvenciája $f_5 = 115 f_0$, hullámhossza pedig $\lambda_2 = 25,50$ cm. Az L5 vivőjelen a polgári felhasználók számára is elérhető kódot alkalmaznak, amely a P-kód mérés pontosságát biztosítja.

9.4.1.1.2 Navigációs üzenetek

Fedélzeti pályaadatok

Mint azt korábban már láthattuk, a helymeghatározás megoldásához meg kell tudnunk határozni a műholdak helyzetét a mérésünk időpontjában, illetve ismernünk kell a műholdon elhelyezett atomóra órahibáját is.

A műholdak Földünk nehézségi erőterében keringenek, ugyanakkor számos egyéb erőhatás is éri őket. Ilyen például a Hold és a bolygók tömegvonzása, a Nap sugárnyomásának hatása, stb. Ha a Föld egy tömegpont lenne, akkor a műholdak egy olyan ellipszis pályán keringénének, amelynek egyik fókuszpontjában a Föld helyezkedne el. Ezt a pályát nevezzük Kepler-pályának. A Föld nehézségi erőterének inhomogenitásai, illetve az említett egyéb erőhatások miatt a műholdak pályáját folyamatosan változó ellipszisekkel írhatjuk le. Ennek megfelelően a műhold helyzetének és a műhold órahibájának számításához az alábbi mennyiségekre van szükségünk:

- ♦ a műhold óraparaméterei, amelyek egy az időtől függő másodfokú polinom segítségével írják le az órahiba értékét;
- ♦ a műhold idealizált ún. *Kepler*-pályájának adatai és a tényleges pályára áttéréshez szükséges időfüggő javítások. A Kepler-pálya egy megadott kezdőidőpontban érvényes pálya, míg a javításokkal adják meg az egyes pályaelemek (a pályae ellipszis alakját és térbeli elhelyezkedését leíró adatok) időbeli változásait. A pályaadatok és a javítások segítségével tudjuk kiszámítani, hogy egy bizonyos időpontban hol helyezkedik el a műhold.;
- ♦ a mérés időpontja.

Egyéb üzenetek

Az egyéb üzenetek közül a polgári felhasználók számára is elérhetők az alábbiak:

- ♦ a GPS időrendszeréből a polgári időrendszerbe áttéréshez szükséges adatok. A GPS időrendszer alapegysége az atomi másodperc, míg a polgári időrendszer a Föld forgásának a periódusidejéhez kapcsolódik. Polgári célú felhasználásnál célszerű a Föld forgásához kötött időrendszer használata, ezzel szemben a távméréshez egy jól definiálható, stabil időrendszerre van szükség, amit nem befolyásol a Föld forgási szögsebességének a változása.
- ♦ az ionoszféra-modell paraméterei: egyfrekvenciás vevők használatakor ezzel a módszerrel vehető figyelembe az ionoszféra hatása (lásd később);
- ♦ az ún. almanach adatai: az almanach letöltése után a vevők ezekből az adatokból állapítják meg, hogy az adott helyen és az adott időpontban melyek a horizont feletti (tehát elvileg észlelhető) műholdak. Az almanach és a fedélzeti pályaadatok közötti lényeges különbség, hogy az almanach csak közelítő pályaszámítást tesz lehetővé, az így számított pálya a helymeghatározásra alkalmatlan. Másrészt az egyes műholdak csak a saját fedélzeti pályadataik sugározzák a felhasználó felé, míg a sugárzott almanach-ban minden műhold közelítő pályája megtalálható.

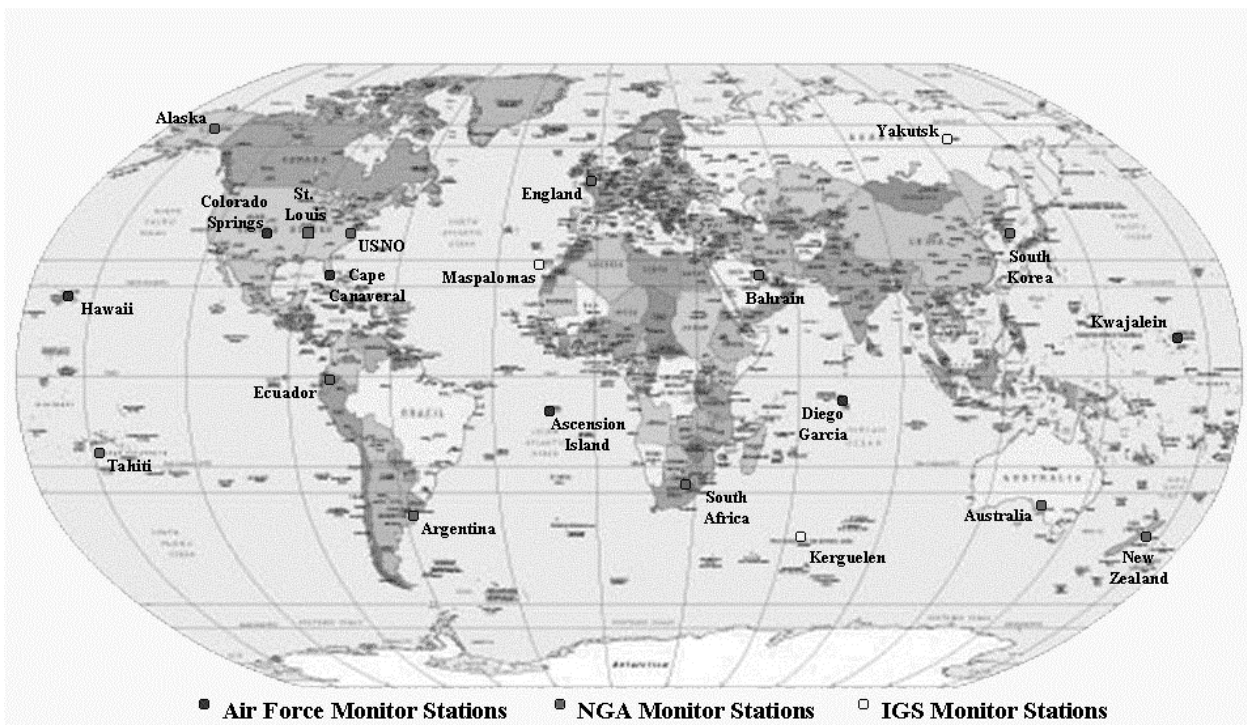
9.4.2 A földi követő állomások alrendszere

Annak érdekében, hogy a műholdak sugározni tudják a fedélzeti pályaadatokat, először is meg kell tudnunk határozni a műholdak pályadatait. Ismert koordinátájú földi követőállomásokról végzett észlelésekből az egyes műholdak pályája meghatározható. A pályameghatározásért, a GPS rendszeridő fenntartásáért, és az egész rendszer üzemeltetéséért a földi követőállomások alrendszere felel. Ez kezdetben öt, amerikai katonai támaszponton üzemelő ismert koordinátájú állomásokat jelentett, ahol az észlelési adatokból előállították a műholdak pályaeqyenletét, és

a szükséges adatokat (órparaméterek, *Kepler*-pálya adatai, pályakorrekciók). Napjainkban ennél lényegesen több követőállomás üzemel, ezáltal a meghatározott fedélzeti pályák is pontosabbá váltak a korábbiaknál. Egyes földi követő állomások ún. telemetria állomások, amelyek rádió-üzenetként a műholdak fedélzetére juttatják a meghatározott pályadatokat és az egyéb üzeneteket annak érdekében, hogy a műholdak aztán azokat a felhasználók felé továbbítani tudják.

Jelenleg a földi követő állomások rendszere az alábbi állomásokból áll (11-4. ábra):

- Fő követőállomás: Colorado Springs, USA. Itt elemzik az összes követőállomás adatait, illetve itt határozzák meg a pályaadatokat is.
- az Amerikai légierő által üzemeltetett követőállomások: Hawaii, Cape Canaveral, Ascension Island, Diego Garcia, Kwajalein
- az Amerikai katonai térképészeti ügynökség (National Geospatial-Intelligence Agency) által üzemeltetett követőállomások az alábbi városokban/államokban üzemelnek: Alaska, St. Louis, Washington D.C., Tahiti, Ecuador, Argentina, Dél-Afrika, Anglia, Bahrain, Ausztrália, Dél-Korea,
- A Nemzetközi GNSS Szolgálat által üzemeltetett követőállomások: Maspalomas, Kerguelén, Jakutsk.



11-4. ábra. A földi követőállomások alrendszere (forrás: NGA)

9.4.3 A felhasználók alrendszere (GPS vevők)

A felhasználók alrendszere alatt az összes navigációs vagy helymeghatározási szolgáltatást igénybevevő felhasználót értjük. A felhasználás területe meglehetősen sokrétű. A műholdas helymeghatározó rendszereket használják a repülésben, hajózásban, a gépjárművek navigációs rendszereiben, rakéták irányításában, de alkalmazzák például földmunkagépek automatikus ve-

zérülésére, tektonikai lemezek elmozdulásainak meghatározására, szökőár előrejelző rendszereknél vagy éppen alacsonyan keringő műholdak helyzetének meghatározásában is. A felhasználási területtől függően eltérő műholdvevő berendezéseket szoktunk használni.

A GPS vevők fontosabb részei az alábbiak:

- antenna: a műholdjelek vételére alkalmas eszköz;
- jelfeldolgozó egység: az észlelt jelek feldolgozását végzi, meghatározza az antenna koordinátáit;
- kijelző: a felhasználóval végzett kommunikációs eszköze;
- adattároló memória: a mérési eredmények, koordináták tárolását teszi lehetővé.
- egyéb műveletek végzésére alkalmas vezérlőegység: általában adatbeviteli lehetőséget biztosító vezérlőegység, amelyek egyéb programok futtatására is alkalmasak (navigáció, adatgyűjtés, geodéziai számítások, műveletek, stb.)

Az említett részek közül a GPS-vevőkben csak az antenna és a jelfeldolgozó egység megléte a közös. A vevők rendkívüli sokfélesége a néhány tízezer forintért beszerezhető kézi navigációs vevőktől a pályakövető hálózatok állomásain működő több millió forintos, nagy pontosságú geodéziai vevőig terjed. A navigációs vevőkkel szemben fontos követelmény a kellően gyors működésű számítógép, a geodéziai vevőkkel szemben pedig a kellően nagy kapacitású adattároló.

A GPS vevők kiválasztása általában meghatározza az elérhető pontosságot, illetve az eredmények felhasználási lehetőségeit. Emiatt mindig a felhasználási célnak megfelelő GPS vevőt kell kiválasztanunk a feladat elvégzéséhez. Míg egy néhány tízezer forintért beszerezhető kézi navigációs vevővel támasztott követelmények között a néhány méteres helymeghatározási pontosságot, a gyors koordinátameghatározást, a könnyű súlyt vagy éppen a térképek megjelenítésének képességét említhetjük, addig a geodéziai célú, jóval drágább vevőknél sokkal fontosabb az antenna kialakítása, a nagy adattároló memória, a hosszú működési idő (az akkumulátor kapacitása).

A GPS vevőket csoportosíthatjuk a felhasználás jellege, és az elérhető pontosság szerint is (11-1 táblázat). Míg a navigációs eszközök elsősorban kód mérésen alapuló helymeghatározásra képesek, addig a jóval drágább, de egyúttal jóval pontosabb geodéziai vevők minden esetben fázismérésen alapuló koordinátameghatározást végeznek.

pontossági kategória	ponthiba	GPS vevőcsoport
tíz méteres	> 10,0 m	Navigációs vevők
több méteres	1,50-10,0 m	
méteres	0,50-1,50 m	Térinformatikai vevők
szubméteres	0,20-0,50 m	
deciméteres	0,05-0,20 m	
centiméteres	5 mm – 50 mm	Geodéziai vevők
milliméteres	< 5 mm	Geodinamikai vevők

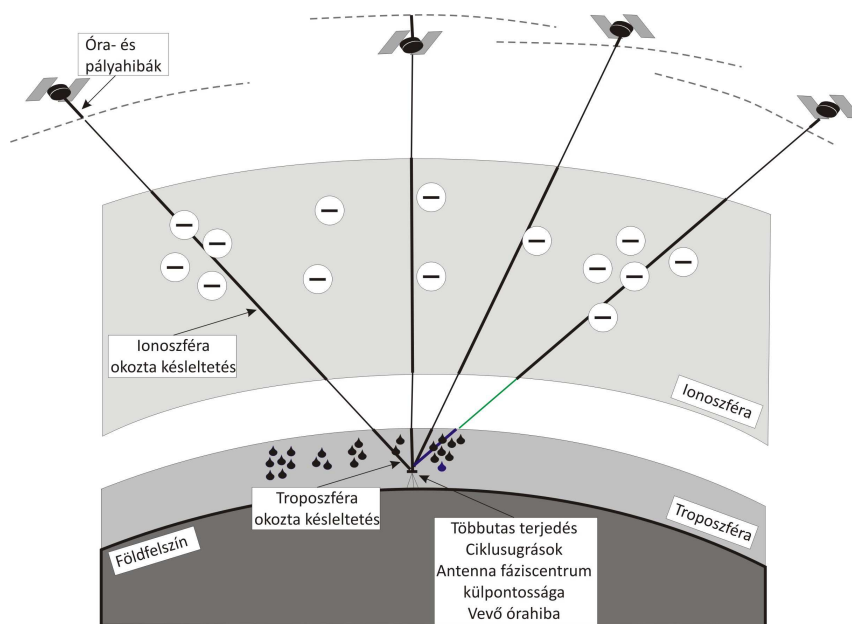
11-1. táblázat. A GPS vevők osztályozása a pontossági igények szerint (Forrás: ACSM)

9.5. A helymeghatározást terhelő hibahatások

Mint már többször említettük, a globális helymeghatározó rendszerek a helymeghatározást mikrohullámú mérőjelek terjedési idejének mérésére visszavezetett távméréssel valósítják meg. A helymeghatározáshoz ismernünk kell a műholdak pontos helyzetét, a műhold és a vevő órahibájának értékét. Eddig azt feltételeztük, hogy az említett mennyiségek ismeretében a terjedési időt megszorozva a fény vákuumbeli terjedési sebességének konstans értékével, a műhold-vevő távolság kiszámítható. Mivel a vivőhullám nem vákuumban, hanem az atmoszférán keresztül jut el a vevőig, így egyéb szabályos hibák is terhelik a mérési eredményeket. Ezen szabályos hibák hatásait különféle modellekkel, illetve megfelelő feldolgozási módszerekkel vehetjük figyelembe. A következőkben röviden áttekintjük a műholdas helymeghatározást terhelő szabályos hibákat (11-5. ábra).

A műholdakhoz kapcsolható hibahatások

Az **órahiba** oka az alapprofrendencia (f_0) csekély ingadozása. Az atomórák akkor építhetők be a műholdakba, ha napi frekvenciastabilitásuk $2 \cdot 10^{-13}$ -nál kedvezőbb. Ez naponta összesen maximálisan 17 ns-os órahibát okoz, amit távolságra átszámítva napi 5 m-es távmérési hibát jelent. Naponta kétszeri adatfrissítéssel (új óraparaméterek megadásával) a hiba 2-2,5 m-re csökkenthető. Ez a 2-2,5 méteres maximális érték a navigációs célú felhasználáshoz elegendő, geodéziai pontosság eléréséhez azonban vagy az órahibák utólagos meghatározására van szükség, vagy olyan helymeghatározási eljárást kell alkalmaznunk, ahol a hiba hatása kiesik.



11-5. ábra. A GPS méréseket terhelő szabályos hibák

A **pályahiba** a fedélzeti adatokkal végzett helymeghatározás esetén kb. 1 m. Abban az esetben azonban, ha nem kell rögtön a mérés pillanatában a vevő koordinátáit meghatároznunk, utólagos pályameghatározás eredményeit is felhasználhatjuk. A Nemzetközi GPS Szolgálat (IGS) Interneten elérhető (<http://igs.cb.jpl.nasa.gov>) ún. precíz pályadatai közül, a mérés után kb. egy nappal letölthető „gyors” pályamegoldás kb. 2,5 cm, míg a mérések után két héttel letölthető „végleges” pályamegoldás még ennél is pontosabbnak tekinthető. Relatív helymeghatározási eljárással (9.6. fejezet) azonban a pályahiba hatása is jelentősen csökkenthető.

9.5.1 A mérőjel terjedéséhez kapcsolható hibahatások

A mérőjel a terjedése során áthalad az atmoszférán. Az elektromágneses jelek terjedése szempontjából az atmoszféra 100 km-nél magasabb része nagyon nagy jelentőséggel bír. Az atmoszféra ezen részét ionoszférának nevezzük, a benne található – a Nap sugárzásának ionizáló hatása miatt kialakuló – töltött részecskék miatt. Az ionoszférában található szabad elektronok a mérőjel terjedési sebességét befolyásolják. Az **ionoszféra** hatása nappal nagyobb, mint éjszaka, nyáron nagyobb, mint télen, emellett függ a 11 éves periódusú napfolttevékenységtől, továbbá a mágneses pólustól való távolságtól. A hatás a zenit irányában éjszaka 1,6-2,4 m, nappal 8-12 m, a még megengedett 15°-os magassági szögű irányban az említett értékek 2,5-szerese. Az ionoszféra hatása frekvenciafüggő, ezért kétfrekvenciás vevőt használva méréssel kiküszöbölhető. Egyfrekvenciás műszer használatakor a műhold által sugárzott ionoszféra-modell segítségével a hibahatás mintegy felére csökkenthető, illetve 10 km-es távolságig az ún. relatív helymeghatározással kiejthető (lásd 9.6 fejezet)

Az atmoszféra másik jelterjedés szempontjából másik fontos része a **troposzféra**. A troposzféra a légkör alsó kb. 40 km vastag része. A légkör tömegének túlnyomó része itt található. A légkör sűrűségének függvényében a mikrohullámú jel terjedési sebessége egyre kisebb a vákumbeli terjedési sebességnél, így a mérőjel később érkezik be a vevőbe, mintha végig vákumban tette volna meg az utat a műhold és a vevő között. A troposzféra hatása a száraz levegő és a vízpára hatása összegeként vehető figyelembe. A troposzféra-modellek szerint a zenit irányában a száraz levegő hatása mintegy 2,3 m, a vízpáráé kb. 0,2 m, de ez utóbbi érték meglehetősen bizonytalan. A még megengedett 15°-os magassági szögű irányban a hatás 3,8-szeres. A troposzféra hatása a légkör alsó rétegének változókéony törésmutatója miatt nagy pontossággal nehezen modellezhető, illetve feldolgozási eljárással is csak részben küszöbölhető ki.

9.5.2 A mérőjel vételéhez kapcsolható hibahatások

A mérőjel vételéhez kapcsolható hibahatások közül a fázismérés eredményét terhelő **ciklusugrás** akkor áll elő, ha mérés közben a műhold valamilyen tereptárgy takarásába kerül, és emiatt megszakad a vevőben folyó ciklusszámlálás. A folyamatos ciklusszámlálás teszi lehetővé, hogy a különböző időpontokban végzett fázisméréseket összekapcsolhassuk, így csak a mérés kezdetekor felmerülő egyetlen ciklustöbbletműség értékét kell ismeretlennek tekintenünk.

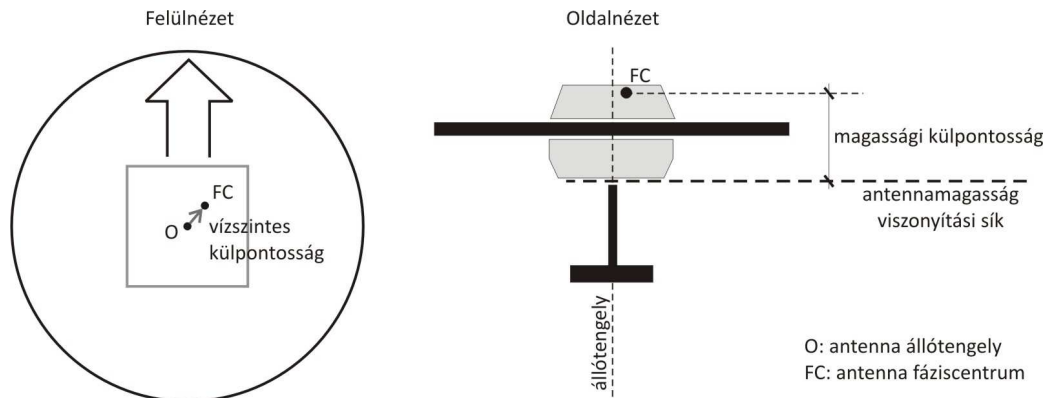
A mérőjel vételének kimaradásakor, ha később helyreáll is a kapcsolat, a kimaradt ciklusszám durva hibával terheli a távolságot. A hiba az álláspont körültekintő megválasztásával elkerülhető, azaz kerülnünk kell az álláspont körül a műholdakat kitakaró objektumokat (fák, épületek, reklámtáblák, stb.). Utólagos feldolgozás esetén a ciklusugrást követően bevezetett új ciklustöbbletműség ismeretlennel a feldolgozás elvégezhető. Egyes feldolgozó szoftverek ezen kívül egyes esetekben meg is tudják állapítani a kimaradt ciklusszámot.

A **zavaró interferencia** jelensége viszonylag ritkán fordul elő: radarberendezések, mobiltelefon átjátszóállomások közelében a vétel megnehezül, esetleg lehetetlenné válik. Ezeket a helyeket kerülnünk.

Az **antenna-fáziscentrum külpontossága** azt jelenti, hogy a műhold-vevő távolság vevőoldali végpontja (az antenna elektronikai középpontja, azaz fáziscentruma) nincs az antenna állótengelyén (vízszintes külpontosság), illetve nincs az antennamagasság megmérésére megjelölt viszonyítási síkban (magassági külpontosság). Bár a műszergyártók igyekeznek olyan antennákat előállítani, ahol a fáziscentrum az antenna állótengelyébe esik, a vízszintes külpontosság mértéke általában néhány mm nagyságrendű. A feldolgozószoftverek a külpontosság értékét antennamodellek segítségével figyelembe tudják venni. Ezek a modellek általában északi és keleti irányú

komponensben adják meg a fáziscentrum vízszintes külpontosságának mértékét, emiatt az antenának található jelet a mérés megkezdése előtt észak felé kell tájolni.

A **többutas terjedés** azt jelenti, hogy a vevőantennára a műholdról közvetlenül érkező jel mellett a környező tereptárgyakról (pl. épületekről) visszaverődött jel is kerül, és ez hibát okoz a távolság meghatározásában. A hiba a kódérések esetén több méteres nagyságrendű is lehet, míg fázisméréseknél néhány cm-es értéket érhet el. Az álláspont körültekintő megválasztásával a hiba hatása elkerülhető. Igazolható, hogy a műholdak mozgása miatt a fázismérés eredményét terhelő hibahatás periódikusan változik, és bizonyos idő (a körülményektől függően 10-20 perc) elteltével a középérték mentes lesz a hiba hatásától. A többutas terjedés tehát csak az ún. gyors módszerekre (rövid ideig tartó mérésekre) veszélyes igazán.



11-6. ábra. A vízszintes és magassági fáziscentrum külpontosság

9.5.3 Különleges hibahatások

A **különleges** hibahatások közül a **relativisztikus hatások** lényege, hogy a speciális relativitáselmélet értelmében a nagyobb sebességű koordináta-rendszerekben az órák járása lelassul, az általános relativitáselmélet értelmében pedig kisebb gravitációjú térben az órák járása felgyorsul. Ennek alapján

- a nagy sebességgel, de gyenge gravitációjú térben mozgó műholdakat kettős hatás éri, de a két hatás nem közömbösíti egymást. Az eredő hatás a műholdak atomórái által előállított f_0 alapfrekvencia parányi csökkentésével küszöbölhető ki;
- a műholdak pálya menti sebessége változó (*Kepler* második törvénye értelmében a műholdak Földközépen gyorsabban mozognak), az emiatt szükséges javítás a műholdak óraparamétereibe kerül;
- a vevő sebessége miatti javítást a feldolgozó szoftver veszi figyelembe.

A **műhold-geometria** hatásának vizsgálatához be kell látnunk, hogy a helymeghatározás pontossága a műhold-vevő távolság meghatározásának pontossága mellett a műholdak egymáshoz és a vevőhöz viszonyított helyzetétől (röviden: a műhold-geometriától) is függ. Csak közel zenitirányú műhold-vevő távolságokkal a vevő magassága pontosan, vízszintes helyzete viszont pontatlanul határozható meg, ugyanakkor csak vízszinteshez közeli távolságokkal a vízszintes helyzet lesz pontos, a magasság pedig pontatlan. Említettük már, hogy az almanach adataival a műhold-konfiguráció bármely helyre és bármely időpontra előállítható, a műhold-geometria hatása tehát tényleges mérés nélkül is meghatározható. Ezt a hatást egy szorzótényezővel szokás kifejezni, amelyet a műhold-vevő távolság (minden műholdra egyformának feltételezett) pontossági mérőszámával megszorozva a helymeghatározás pontossági mérőszámát kapjuk. A szorzótényező a nem túl szerencsés „pontosság-hígulás” szó angol megfelelőjének (*dilution of precision*) rő-

vidítése: DOP. A műhold-geometria ismeretében többféle DOP-érték számítható. Ha a távolság pontossági mérőszámát

- ♦ a vízszintes helyzetre vonatkozó HDOP (H – *horizontal*) értékével szorozzuk, az eredmény a vízszintes helyzetmeghatározás pontossági mérőszáma;
- ♦ a magasságra vonatkozó VDOP (V – *vertical*) értékével szorozzuk, az eredmény a magasságmeghatározás pontossági mérőszáma;
- ♦ a térbeli helyzetre vonatkozó PDOP (P – *position*) értékével szorozzuk, az eredmény a térbeli helyzetmeghatározás pontossági mérőszáma.

Belátható, hogy $PDOP^2 = HDOP^2 + VDOP^2$. A műholdrendszer teljes kiépítése óta a PDOP jellemző értéke 2 és 3 közötti. Ez azonban csak akkor igaz, ha valamennyi, a horizont felett 15° -nál magasabban mozgó műhold észlelhető. A helyi kitakarások miatt a PDOP értéke veszélyesen megnövekedhet (minél kisebb a DOP értéke, annál pontosabb a helymeghatározás).

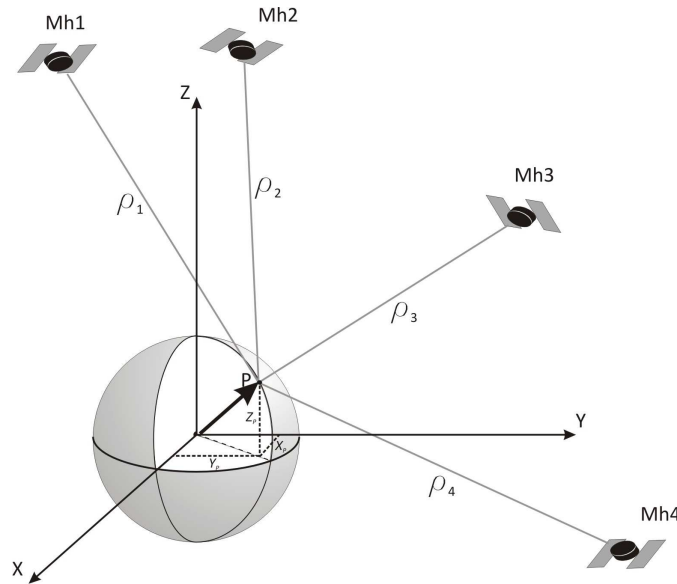
Nézzünk egy rövid példát a helymeghatározás pontossági mérőszámainak előállítására. Példánkban használjuk a C/A kódérés 3 m-es távmérési hibáját. A HDOP és a VDOP értéke legyen 3, illetve 4. Ekkor a vízszintes és a magassági helyzetmeghatározás pontossága rendre 9, illetve 12 méter. A HDOP és a VDOP értékekből előállítható a PDOP értéke: $PDOP = 5$. Így a térbeli helyzet várható pontossága az adott műholdgeometria esetében 15 méter.

Megemlítjük még, hogy a DOP-érték az abszolút helymeghatározás pontossági mérőszáma, ennek ellenére a relatív helymeghatározás pontosságának értékeléséhez is felhasználják.

9.6. A helymeghatározás lehetőségei

A helymeghatározást terhelő szabályos hibahatások áttekintését követően belátható, hogy a szabályos hibák jelenleg nem modellezhetők olyan pontossággal, hogy az a geodéziai pontosságú helymeghatározást lehetővé tegye. Ezért ezeket a hibákat megfelelő mérési eljárással kell kiküszöbölnünk. Ennek megfelelően különféle helymeghatározási lehetőségeket kell megkülönböztetnünk.

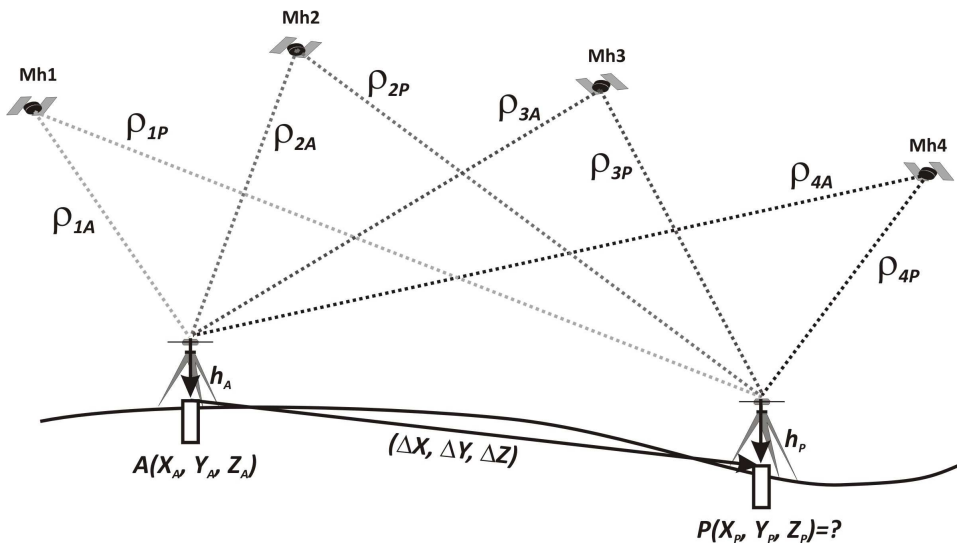
Abszolút helymeghatározásról akkor beszélünk, ha a vevőantenna helyzetét a kezdőpontról (a geocentrumból) az antennára mutató **helyvektorral** határozzuk meg. Az abszolút helymeghatározás eredménye tehát a vektor végpontjának X, Y, Z három térbeli derékszögű koordinátája (4-7. ábra). Belátható, hogy a pont koordinátái az ún. ellipszoidi földrajzi (geodéziai) koordináta-rendszerben is megadhatók φ ellipszoidi földrajzi szélességként, λ ellipszoidi földrajzi hosszúságként és h ellipszoid feletti magasságként (11-1. és 11-7. ábra).



11-7. ábra. Az abszolút helymeghatározás

Az abszolút helymeghatározást elsősorban navigációs célú alkalmazások esetén használjuk. A viszonylag alacsony pontossági igény (néhány méter) lehetővé teszi, hogy a szabályos hibákat különféle modellekkel vegyük figyelembe. Ennek megfelelően a fedélzeti pályaelemek, navigációs üzenetek, ionoszféra és troposzféra modellek segítségével elvégezhető a navigációs célú helymeghatározás.

A geodéziai pontosság eléréséhez a szabályos hibákat, mint pl. a műhold órahiba vagy az ionoszféra hatása, megfelelő mérési eljárással kell kiküszöbölnünk vagy csökkentenünk. Abban az esetben, ha egy vevő helyett kettőt használunk, és az egyik vevőt egy ismert koordinátájú ponton (referenciaponton), míg a másikat ezzel egyidejűleg a meghatározandó ponton helyezük el, akkor **relatív helymeghatározásról** beszélünk (11-8. ábra). Ekkor nem a geocentrumból mutató helyvektort, hanem a referenciapont és meghatározandó pont közötti **különbségvektort** határozzuk meg. A relatív helymeghatározás eredménye tehát a két pont három koordináta-különbsége.



11-8. ábra. A relatív helymeghatározás

A relatív helymeghatározás előnye, hogy a szabályos hibák hasonlóan hatnak mindkét vevőre, így a műholdóra hiba, valamint az ionoszféra hibája is megközelítőleg 10 km-es távolságig kiejtethető. A műholdak pályahibájának hatása pedig jelentősen csökkenthető.

Mind abszolút, mind relatív helymeghatározás esetén végezhetünk **statikus** helymeghatározást, illetve **kinematikus** helymeghatározást. Statikus helymeghatározásról akkor beszélünk, ha a meghatározandó ponton lévő műszer mozdulatlan, **kinematikus** helymeghatározásról pedig akkor, ha az említett műszer mozog, tehát mozgáspályájának több pontját határozzuk meg. A statikus helymeghatározás pontosabb a kinematikusnál a sokkal több fölös mérés miatt.

A helymeghatározási eljárásokat megkülönböztethetjük a feldolgozás jellege, időszükséglete szerint is. **Valós idejű eljárásokról** beszélünk, ha a vevő helyzetének meghatározása és az eredmény közlése a méréssel közel egyidejűleg történik, míg **utófeldolgozások eljárásról** beszélünk akkor, ha a koordinátamegoldásokat a mérést követően, irodai feldolgozás után határozzuk meg.

A geodéziai pontosságot biztosító valós idejű eljárások előnye, hogy csak ezek használhatók pontok kitűzésére is.

9.7. Észlelési módszerek

Korábban már említettük, hogy geodéziai (centiméteres) pontosság csak **relatív** módszerrel érhető el, ezért az észlelési módszerek ismertetésekor a „relatív” jelzõt elhagyjuk. A statikus és a kinematikus mérések megkülönböztetése mellett még egy fontos különbséget kell tennünk. A **valós idejű** feldolgozás azt jelenti, hogy a mérési eredmények feldolgozása szinte egyidejű a méréssel. Az ilyen feldolgozás kitűzések esetén nélkülözhetetlen, más mérések (pl. részletes felmérés) esetén előnyös. Az **utólagos** feldolgozás nagyobb mérési anyagból, részletesebb elemzés eredményeként általában pontosabb helymeghatározást biztosít.

A továbbiakban az észlelési módszereket az alábbi sorrendben ismertetjük: az **utófeldolgozások** módszerek között mind **statikus**, mind **kinematikus** módszerek vannak. Statikus módszer esetén az ismert és a meghatározandó pontokon elhelyezett GPS vevők hosszabb ideig folyamatosan észlelik a műholdakat. A mérési idő az alkalmazott eljárástól függ, de általában minimálisan 10 perc. Statikus méréseknél a GPS antennákat az antennák mozdulatlanságának biztosítása miatt műszerállványon helyezük el. Statikus módszer a **hagyományos statikus** és a **gyors statikus** módszer.

A **kinematikus** módszerek esetében az ismert koordinátájú referenciaponton felállított GPS vevő statikus észlelést végez, míg a meghatározandó pontokat bejáró „mozgó” (rover) vevő a mérési időtartam alatt mozoghat. A kinematikus módszerek között említhetjük a **félkinematikus** és a **valódi kinematikus** módszereket.

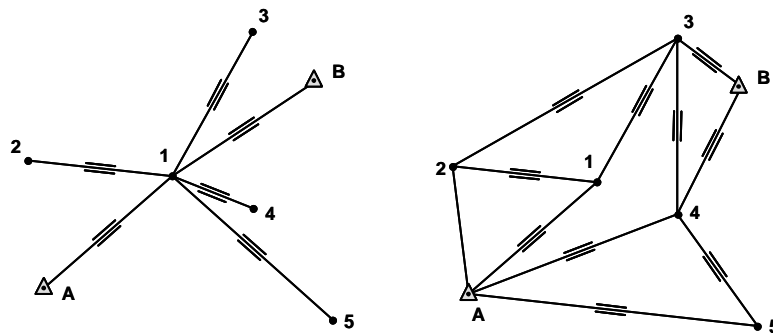
A **valós idejű** módszerek alapvetően **kinematikus** jellegűek, de mozdulatlan vevő helyzetének meghatározására is alkalmasak. A két alapvető módszer a **differenciális GPS** (DGPS) és a **valós idejű kinematikus** (*real time kinematic*, RTK).

9.7.1 Statikus mérési módszerek

A **hagyományos statikus** módszer sokáig az észlelés egyetlen (de a mai napig is a legpontosabb) mérési módszere volt. Több óráig, esetleg napokig tartó észleléssel 15 km-nél hosszabb vektorok milliméteres pontosságú meghatározására alkalmas. Elsősorban nagy pontosságú (pl. alaphálózat vagy mozgásvizsgálat céljára létrehozott) hálózatok mérésére használják.

A **gyors statikus** módszer a feldolgozó szoftverek fejlődése nyomán alakult ki. A módszerrel 15 km-nél rövidebb vektorok 1-2 cm pontossággal mérhetők. A mérési idő a vektor hosszától függően egyfrekvenciás vevővel 20-40 perc, kétfrekvenciás vevővel 10-20 perc; emellett követelmény a jó műhold-geometria is ($PDOP < 3$).

A statikus (vagy gyors statikus) mérések esetén a referenciapontok és a meghatározandó pontok geometriai elrendezése a 5-1. ábra szerint lehet sugaras vagy hálózatszerű. **Sugaras** elrendezés mellett az egyik vevő (az ún. referenciavevő) mindig ugyanazon a központi fekvésű ponton mér, míg a többi, ún. mozgó vevő sorra felkeresi a többi pontot. **Hálózatszerű** elrendezés mellett valamennyi vevő „vándorol”; a vevők egy-egy mérési periódusban a hálózat egy-egy elemét (pl. három vevő egy háromszöget) határoznak meg. A relatív eljárásnak köszönhetően, a méréseink feldolgozása során az egyidőben mért pontok háromdimenziós koordinátakülönbségeit határozzuk meg. A hálózatszerű elrendezés előnye, hogy ebben az esetben a pontok között vektorháromszögek alakíthatók ki. Egy-egy ilyen vektorháromszögben a koordinátakülönbségek összegzésével nullvektort kell kapnunk, így lehetőségünk nyílik a méréseink ellenőrzésére is. A hálózatszerű elrendezés hátrányaként említhetjük a hosszabb mérési időszükségletet, illetve a magasabb szállítási költségeket. Gyors statikus módszerhez, a rövid mérési idő mellett is biztonságot nyújtó sugaras elrendezés ajánlott. Ilyenkor azonban célszerű ellenőrzésként a méréseket más műholdgeometria mellett (azaz más időpontban) megismételni. A meghatározott pontok koordinátáinak ellenőrzését akár hagyományos mérési eljárásokkal is elvégezhetjük (pl. szabadálláspont létesítése a meghatározott és adott pontokról).



11-1. ábra. Alappontsűrítés statikus módszerrel:
a – sugaras, b – hálózatszerű elrendezésben

Az alappontsűrítés az **előkészítéssel** kezdődik. A pontok helyének kiválasztásakor a következőkre kell ügyelnünk:

- ◆ a pont helyéről minél teljesebb kilátás nyíljon az égboltra;
- ◆ a gépkocsival könnyen megközelíthető pont lehetőleg közterületen legyen;
- ◆ a pont tartós fennmaradása biztosított legyen.

A terepi bejárás során elkészítjük az elérési útvonalat tartalmazó térképvázlatot, a pont helyét ideiglenesen (cövekkel) megjelöljük, és hozzávetőlegesen meghatározzuk az égboltra látást esetleg akadályozó tereptárgyak irányát és a kitakarás szögének nagyságát. A pontok végleges megjelölése (az állandósítás) után elkészítjük a nyilvántartáshoz szükséges pontleírást (természetesen vízszintes koordináták és magasság nélkül). A közvetlenül a részletes felmérés céljára létesített ún. felmérési alappontokat nem kell állandósítani. Az előkészítéshez tartozik a mérésre alkalmas időszakok (ún. mérési ablakok) kiválasztása is. A feldolgozó szoftver tervező moduljának meg kell adni a mérés helyét, időpontját, az esetleges kilátási akadályokat, a mérési időszak szükséges legrövidebb időtartamát és a még elfogadható PDOP-értéket. Az adatok birtokában a tervező

modul – a műholdak almanach adatainak ismeretében – kijelzi a mérésre alkalmas időszakok kezdetének és végének időpontját, ami megkönnyíti a mérési ütemterv elkészítését.

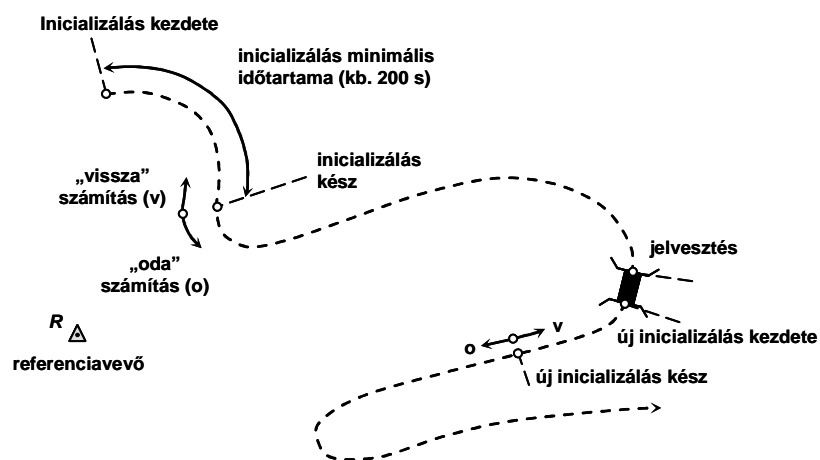
Mérés előtt ellenőrizni kell, hogy valamennyi műszeren statikus üzemmód, egyforma antenakitakarási magassági szög (általában 15° , az ennél alacsonyabban mozgó műholdakkal a vevő nem lép kapcsolatba), és ami rendkívül fontos, azonos mintavételezési (rögzítési) időköz (rendszerint 15 másodperc) legyen beállítva. (Relatív módszerrel legalább két műszerrel, egyazon időpontokban rögzített mérési eredmények dolgozhatók fel.) Az antenna pontra állítását és az antennamagasság megmérését különös gonddal kell elvégezni, mert az itt elkövetett hibák nem javíthatók.

A műsértípushoz rendszeresített ún. kereskedelmi szoftverrel végzett **feldolgozás** jórészt automatikus, eredménye valamennyi mért vektor három-három koordináta összetevője és a vektor pontosságát jelző mérőszám.

9.7.2 Kinematikus mérési módszerek

A fázisméréssel végrehajtott **kinematikus** módszerek közös jellemzője a mérés **inicializálásának** szükségessége. Inicializáláson a fázismérés kezdeti időpontjához tartozó műhold-vevő távolságon elhelyezhető N egész hullámszám meghatározása értendő. Ha a kinematikus mérés ismert pontról indul, azaz mind a referenciavevő, mind a mozgó vevő egy-egy ismert koordinátájú ponton elhelyezhető, akkor az inicializálás egyszerű, mivel a műhold-vevő távolság az ismert vevő koordinátákból kiszámítható. A fázismérés alapelve miatt, az N ciklustöbbségtelműség meghatározását követően – amennyiben ciklusugrás nem következik be – a műhold-vevő távolságok a fázismérések segítségével előállíthatók. Így az inicializálást követően a vevő akár mozoghat is, az általa megtett útvonal pontjainak koordinátái meghatározhatók.

A feldolgozó szoftverek fejlődése révén az inicializálás akár menet közben (*on-the-fly*, OTF) is elvégezhető (5-2. ábra), így nincsen szükségünk két ismert koordinátájú pontra az inicializálás végrehajtásához. Az OTF inicializálás esetén az ismeretlen pontból induló mozgó vevő által rögzített adatokból és a referenciavevő észleléseiből utófeldolgozással elvégezhető az inicializálás. Ehhez néhány perces mérésre van szükségünk. Az inicializálás elvégzését követően a további pontok koordinátái számíthatóak, míg az inicializálás előtt bejárt útvonal az ún. visszafelé történő feldolgozással szintén meghatározható. Napjainkban a kezdeti ciklustöbbségtelműség feloldása már valós időben is lehetséges.



5-2. ábra. Mérés félkinematikus módszerrel, menet közbeni inicializálással

A **félkinematikus** (*stop and go*) módszer lényege, hogy a vevő az inicializálást követően, adatrögzítés nélküli folyamatos mérési kapcsolatot tart a műholdakkal miközben halad a meghatározandó pontokat „felfűző” vonalon. A meghatározandó pontokon a vevő rövid időre (20-30 másodpercre) megáll és adatokat rögzít. A módszert felmérési alappontok sűrítésére, esetleg részletes felmérésre használják, pontossága 2-3 cm. A műholdas részletmérés előnye, hogy a referenciavevő és a mozgó vevő(k) között szükségtelen az összelátás, hátránya viszont, hogy a részletpontokon a műholdak könnyen kitakarásba kerülhetnek.

A **valódi kinematikus** módszerrel rendszerint egy meghatározandó útvonal pontjait rögzítjük. A vevő valamilyen járműhöz van erősítve, az adatrögzítési időköz a kívánt pontsűrűségtől és a jármű sebességétől függ. A módszert vonalas létesítmény tengelyvonalának felmérésére, domborzat felmérésére, légifényképezéskor vagy mederfelméréskor a fényképező repülőgép vagy a mérőhajó helyzetének meghatározására használják, pontossága 3-5 cm.

9.7.3 Valós idejű módszerek

A **valós idejű** helymeghatározás módszereinek közös jellemzője, hogy a meghatározandó ponto(ko)n működő mozgó vevő(k) a pontosság fokozásához külső segítséget kap(nak) ismert ponto(ko)n működő referenciavevő(k)től. A valós idejű módszerek előnye, hogy nem igényelnek utólagos irodai feldolgozást. A mért koordinátákat a műszerek a terepi méréssel egyidőben határozzák meg.

A **differentiális GPS** (DGPS) módszerének legegyszerűbb változatában az ismert ponton álló referenciavevő kódolás segítségével megméri a távolságot valamennyi műholdtól. Ezt követően a saját ismert koordinátája és a műhold ismert pozíciója alapján kiszámítja a tényleges távolságot. A két távolság különbségeként előállíthatók a távolságjavítások, amelyeket rádióüzenetként sugároznak az állomások a saját hatáskörzetükben helymeghatározást végző mozgó vevőknek. A mozgó vevők a saját maguk által észlelt műhold-vevő távolságokat a kapott távolságjavítások figyelembevételével pontosabb helymeghatározást végezhetnek. Ki kell hangsúlyoznunk, hogy a DGPS kódtávolságokat használ, emiatt a módszerrel legfeljebb ún. szubméteres (0,5-0,8 m pontosságú) helymeghatározás végezhető. Ez a pontosság geodéziai célokra nem elegendő, de kiválóan megfelel a navigáció és a térinformatika céljaira, vagy akár mezőgazdasági gépek vezérlésére.

A **valós idejű kinematikus** (röviden: RTK) módszer a távközlés adatátviteli sebessége erőteljes növekedésének köszönheti elterjedését. Az átjátszó állomásként működő referenciavevő a mért műholdakról érkező jelek alapján mért kódtávolságokat és fázistávolságokat az álláspont koordinátaival együtt tovább sugározza a mozgó vevők számára. A mozgó vevők a saját mérseik, illetve a referenciavevő méréseinek felhasználásával elvégzik az inicializálást. Ezt követően a fázismérések relatív feldolgozásával a saját valós idejű, fázismérésen alapuló 1-2cm pontos koordinátáikat is kiszámítják. Az 1-2 cm pontosságú helymeghatározás feltétele a legalább öt műhold és a jó műhold-geometria. A módszert elsősorban kitérésre, illetve részletes felmérésre használják.

9.8. GNSS-infrastruktúra

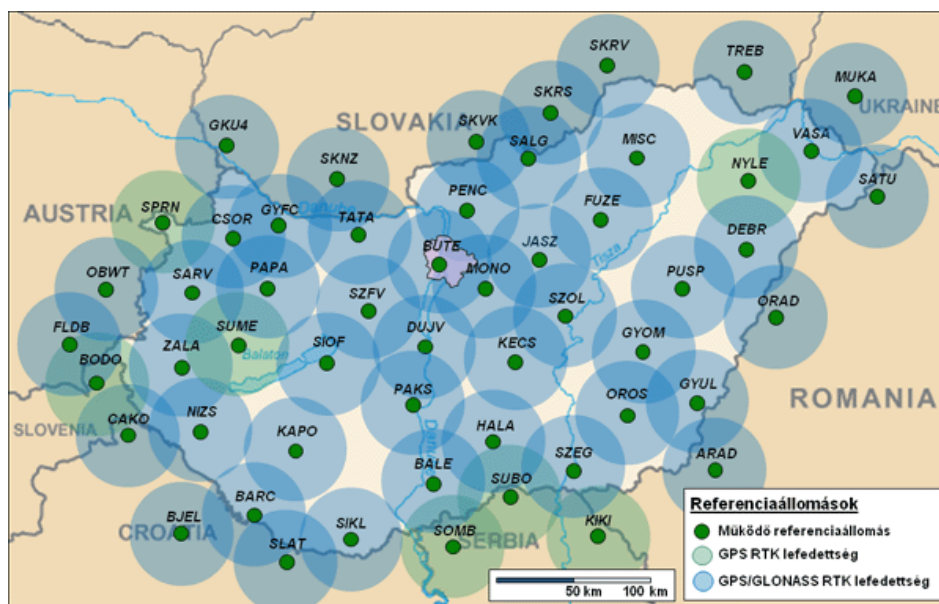
A GNSS (*Global Navigation Satellite System*) elnevezés magába foglalja a műholdas helymeghatározás ún. alaprendszerei (GPS, GLONASS, Compass, Galileo) mellett azokat a kiegészítő (kiterjesztő) rendszereket, amelyek rendeltetése az országos (összekapcsolt rendszerek esetében akár kontinensnyi méretű) használat biztosítása, továbbá a helymeghatározás biztonságának és pontosságának a növelése.

Mind a DGPS, mind az RTK fogyatékosága, hogy az egyetlen referenciavevő hatáskörzete erősen korlátozott, emellett a referenciavevő hibás működése esetén az új pontok is hibásak lesznek, a referenciavevő üzemképtelensége esetén pedig a rendszer sem működik. Ezen a fogyatékoságon segít, ha az ország területén ismert pontokon folyamatosan működő ún. permanens állomásokként referenciavevőket üzemeltetünk.

A hazánkban kiépített GNSS-infrastruktúrának több generációja volt. Az első generációs GNSS infrastruktúrát az Országos GPS Hálózat jelentette. Ez az Egységes Országos Vízszintes Alaphálózat pontjaira támaszkodó hálózat, amely 1153 pontból áll. Az Országos GPS Hálózat létesítésének egyik célja az volt, hogy az egész ország területén maximálisan 10 km-es vektorhosszak mérésével relatív helymeghatározást lehessen megvalósítani. Ehhez meghatározták a már említett 1153 pont WGS-84 koordinátáit. Mivel az OGPSH pontok egyben az EOVA tagjai, így minden pont nem csak WGS-84, hanem EOVA koordinátákkal is rendelkezik. Ennek köszönhetően megvalósíthatóvá vált a WGS-84 koordináta-rendszerben GPS technikával mért koordináták beillesztése az EOVA vetületi koordináta-rendszerébe.

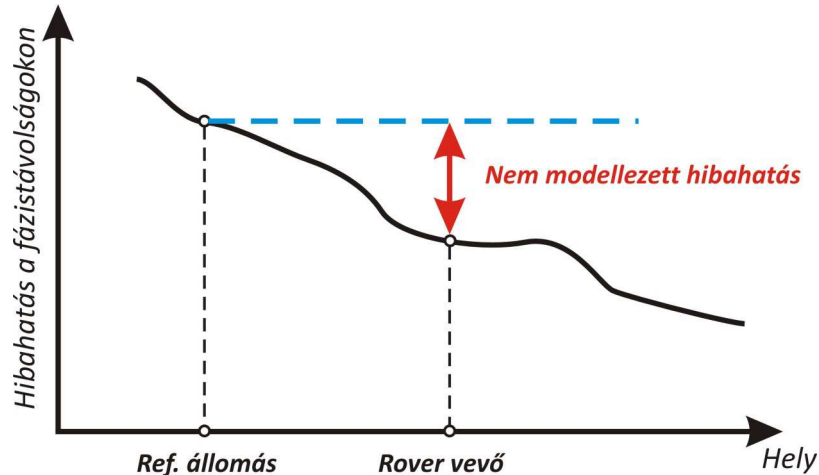
A második generációs hálózat (1997-2005) célkitűzése az volt, hogy a felhasználóknak a relatív helymeghatározási eljárásához ne kelljen ismert koordinátájú ponton felállított referenciavevőt (bázisállomást) használniuk. Ennek eléréséhez az országban nagyjából egyenletesen 12, folyamatosan üzemelő referenciaállomást helyeztek üzembe. Egy-egy állomás hatósugara gazdasági megfontolások miatt 50 km volt. Az állomások adatait a fenntartó Földmérési és Távérzékelési Intézetől vásárolhatták meg a felhasználók.

Az 50 km-es hatótávolság azonban nem tette lehetővé a cm pontos RTK helymeghatározást, mivel a relatív helymeghatározás pontossága a bázisvonalhossz (a referenciavevő és a mozgó vevő távolsága) növekedésével csökken. Emiatt az állomáshálózat sűrítésével épült ki a harmadik generációs, úgynevezet **Valós idejű GNSS hálózat** (<http://www.gnssnet.hu>). Ez hazánkban 35 permanens (a nap 24 órájában, a hét 7 napján folyamatosan üzemelő) GNSS állomás létesítésével jött létre. Az állomások túlnyomó többsége nem csak a GPS, hanem a GLONASS műholdrendszer észlelésére is alkalmas. Annak érdekében, hogy az országhatár mentén is optimális legyen a lefedettség, a hazai hálózatba integrálták a szomszédos országok hasonló hálózatainak országhatár mentén elhelyezkedő állomásait is. Ez további 18 állomás felhasználását jelenti.



5-4.ábra. Permanens GPS-állomások; a körök sugara 25 km-nek felel meg. A Budapesten működő BUTE állomást a BME Általános és Felsőgeodézia Tanszéke üzemelteti 2000 novemberében óta

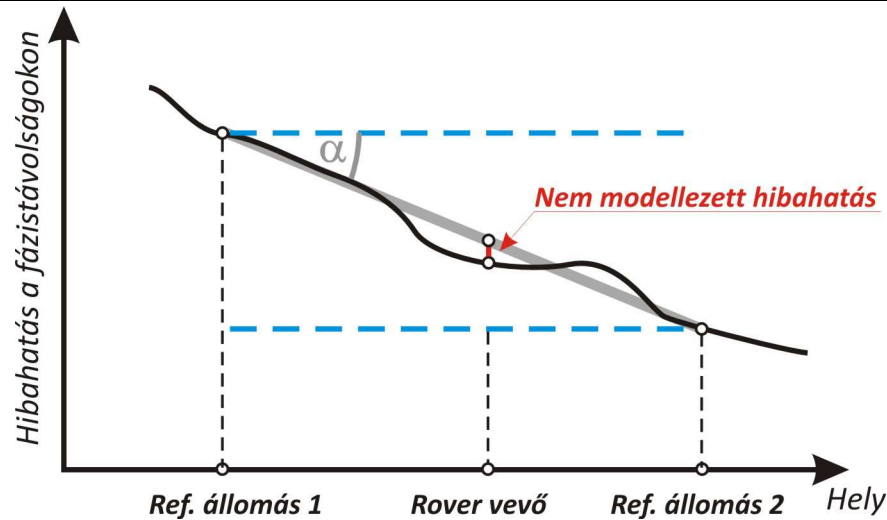
A harmadik generációs hálózatban a referencia állomások saját észleléseiket a feldolgozó központba továbbítják, ahol az összes állomás adatait együttesen feldolgozva meghatározhatók a különféle szabályos hibák hatásai a földrajzi hely függvényében. Míg egy bázisállomást használva a relatív helymeghatározás pontossága a szabályos hibák hatásának térbeli változásai miatt a bázisvonal növekedésével csökken (5-5. ábra), addig több referenciaállomás felhasználásával ezek a térbeli változások is figyelembe vehetők. Az ily módon meghatározott hibamodelleket felhasználva a felhasználók homogén helymeghatározási pontosságot érhetnek el. Mivel ebben az esetben a referenciaadatok egy teljes hálózat együttes feldolgozásának eredményei, ezért ezt a valósidejű helymeghatározási eljárást **hálózati RTK**-nak nevezzük.



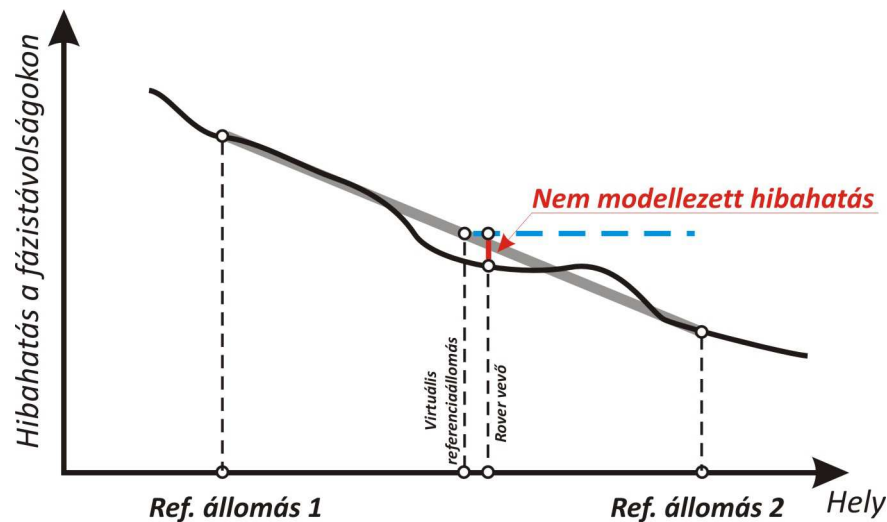
5-5. ábra. Szabályos hibák figyelembevétele egyetlen referenciaállomás esetén. A hibahatások térbeli változását a fekete görbe írja le.

A hálózati RTK eljárás továbbra is egy relatív helymeghatározási módszer. Így a felhasználó számára a GNSS infrastruktúra továbbra is ismert koordinátájú ponton észlelő referenciaállomás adatsort szolgáltat. Ezt alapvetően kétféleképpen tehetik meg:

- a mozgó vevő megkapja a legközelebbi referenciaállomás adatait, valamint a szabályos hibák hatását leíró ún. korrekciófelület paramétereit (az 5-6. ábra vastag szürke vonalának α meredekségét). Ekkor a mozgó vevő az aktuális helyzetének megfelelő korrekcióit saját közelítő vízszintes koordinátáinak ismeretében megtudja határozni. Ezt az eljárást **felületi korrekciós paraméterek (FKP)** módszerének hívjuk (5-6. ábra).
- a mozgó vevő elküldi a feldolgozóközpontba a saját közelítő koordinátáit, amelyek alapján a feldolgozóközpont egy a felhasználó közelében elképzelt ún. virtuális referenciaállomás adatsort állít elő. A virtuális referenciaállomás adatsor nem más, mint olyan észlelések halmaza, amelyet a felhasználó közelében elhelyezett referenciaállomás észlelne. Ezt az eljárást **virtuális referenciaállomások (VRS)** módszerének nevezzük (5-7. ábra).



5-6. ábra. Szabályos hibák figyelembevétele a Felületi Korrekciós Paraméterek (FKP) eljárással.



5-7. ábra. Szabályos hibák figyelembevétele a Virtuális Referenciállomások (VRS) módszerével.

Az 5-6. és 5-7. ábrákból látható, hogy bármelyik a hálózati RTK megoldások előnye, hogy úgy működnek, mintha nagyon rövid bázisvonalakat használnánk. Így az elérhető helymeghatározási pontosság homogénnek tekinthető. Meg kell azonban említenünk a hálózati RTK megoldások egy fontos korlátozó tényezőjét is. A valós idejű adatok továbbítására hazánkban az Internetet használják. Emiatt elengedhetetlen, hogy a terepi méréseink helyén elérhető legyen valamilyen mobil Internet szolgáltatás is. Hiába van tökéletes kilátás az égboltra, ha a korrekciókat terepi Internet eléréssel nem tudjuk letölteni a hálózat központi szerveréről.

A hazai GNSS-infrastruktúra az ún. **földi kiegészítő rendszerek** (Ground based Augmentation System – GBAS) közé tartozik. Ezek olyan földi telepítésű rendszerek, amelyek a műholdas helymeghatározás pontosságának növelését tűzték ki célul.

A navigáció és a térinformatika erőteljes térhódítása miatt felértékelődött a DGPS-korrekciók jelentősége is. A hazai GNSS-infrastruktúra a Monoron található állomásáról szolgáltat DGPS korrekciókat (azaz kódtávolság javításokat).

A kiegészítő rendszerek másik fő típusát a **műholdas kiegészítő rendszerek** (Satellite based Augmentation System – SBAS) alkotják. A műholdas kiegészítő rendszerek célja, hogy nagy területre (pl. kontinensekre) biztosítsanak DGPS korrekciókat. A DGPS korrekciók területfüggő meghatározására szolgáló rendszer működése a javítások meghatározásáig gyakorlatilag azonos a hálózatba szervezett permanens állomások rendszerének működésével. Ezután azonban a fel dolgozó központ a korrekciókat rádióüzenetként egy ún. geostacionárius (a Föld felszínéhez képest mozdulatlan) műholdra juttatja, amely visszasugározza azokat a szolgáltatás kontinensnyi területére.

A napjainkban a hazánkban elérhető szolgáltatások közül, a Galileo alaprendszerhez létesített EGNOS szolgáltatása ingyenes. A rendszer a Galileo üzemszerű működéséig a GPS-műholdakra vonatkozó DGPS-korrekciókat sugározza. A javított kódtávolságokkal a helymeghatározás 2-3 m pontossággal végezhető el. A szubméteres (0,5-0,8 m) pontosságot biztosító OmniStar és LandStar rendszerek használatáért fizetni kell.

9.9. A „GPS-koordináták” beillesztése az állami földmérés vonatkoztatási rendszerébe

A GPS vonatkoztatási rendszere a már említett WGS-84, amely némi egyszerűsítéssel egy ismert nagyságú, alakú, geocentrikus elhelyezését és ismert módon tájolt forgási ellipszoidnak, illetve a hozzá kapcsolódó térbeli derékszögű koordinátarendszerként fogható fel. A GPS mérések eredményét vagy X, Y, Z térbeli derékszögű koordinátákként, vagy a WGS-84 ellipszoidon értelmezett φ, λ ellipszoidi földrajzi szélességként és hosszúságként, illetve a h ellipszoid feletti magasságként kaphatjuk meg. Ez a kétféle koordinátahármas egymásnak egyértelműen megfeleltethető. A feladatunk tehát nem más, mint hogy az előbb említett koordinátahármasból előállítsuk a bemért pontok vetületi koordinátáit (EOV y, x), illetve a Balti alapszint feletti magasságát (H).

Az alkalmazott eljárás térbeli hasonlósági transzformáció, amelyet Helmert-transzformációnak is nevezünk. A módszer lényege, hogy két térbeli derékszögű koordinátarendszer között meg kell határozni azt a hét paramétert, amelyek segítségével az egyik koordinátarendszert áttranszformálhatjuk a másik rendszerbe. A hét paraméter nem más, mint a két koordinátarendszer origójának koordinátakülönbsége (3 paraméter), az egyes tengelyek körül elforgatások (3 forgatási szög), illetve a méretarányeltérést kifejező egyetlen méretaránytényező.

A térbeli hasonlósági transzformáció alkalmazásához mind a WGS-84, mind az országos rendszerben térbeli derékszögű koordinátákat kell előállítanunk. A WGS-84 rendszerben a koordinátáink már eleve térbeli derékszögű koordináták, így ezzel nem kell foglalkoznunk. Az országos rendszerben adott koordinátákat, mivel azok egyrészt vetületi koordináták (y, x), illetve Balti alapszint feletti magasságok (H), másképpen kell kezelniük. Az országos rendszerben adott pontok „helyi” térbeli derékszögű koordinátáinak számításához röviden elevenítsük fel az Egységes Országos Vetületi rendszerről tanultakat.

Az Egységes Országos Vetületi Rendszer a kettős vetítés elvét alkalmazza. Az alapfelületként szolgáló ellipszoidi pontokat első lépésben egy simulógömbre (az új Gauss gömbre) vetítjük. Ezt követően a gömbi pontokat egy ferde-tengelyű, metsző hengervetületre vetítjük, amely henger már síkbafejthető felület. A vetítés matematikai egyenletek, az úgynevezett vetületi egyenletek, segítségével történik. A vetületi egyenletek ismeretében a számítás megfordítható, azaz az ismert EOV (y, x) koordinátákból első lépésben gömbi, majd második lépésben az alapfelületként szolgáló ellipszoidi koordinátákat ($\varphi_{helyi}, \lambda_{helyi}$) határozhatunk meg.

Az állami földmérés által használt vonatkozási rendszer (HD72) alapfelületének definiálása-kor azonban az nem volt követelmény, hogy a forgási ellipszoid szintén geocentrikus elhelyezését legyen. Sokkal fontosabb volt ennél, hogy az ellipszoid a geoid hazai darabjához jól illeszkedjen. Emiatt azonban nem csak ennek a „helyi” ellipszoidnak a geometriai jellemzői (méret, lapultság) térnek el a WGS-84 ellipszoidtól, hanem az ellipszoidok középpontja is eltérő helyzetben található, ráadásul a két ellipszoid nem is egyállású (a tengelyek sem párhuzamosak).

Vegyük észre, hogy a kettős vetítés során mindig az alapfelületről történik a vetítés, nem pedig a terepi pontból. Ennek megfelelően a pont „helyi” ellipszoid feletti magasságának kiszámítása a következők szerint történik. Abban az esetben, ha az alapfelületként használt ellipszoid egybeesne a geoiddal, akkor nem kellene semmit sem tennünk, hiszen a Balti alapszint feletti magasság megegyezne az ellipszoid feletti magassággal. A Föld elméleti alakja – a geoid – azonban nem írható le olyan egyszerű geometriai objektummal, mint egy forgási ellipszoid. Emiatt ismernünk kell, hogy mekkora a távolság a geoid és az ellipszoid között. A geoid és az ellipszoid felülete közötti távolságot geoidundulációnak (N) nevezzük. A geoidunduláció ismeretében a helyi ellipszoid feletti magasság az alábbi képlettel számítható ki:

$$h_{\text{helyi}} = H - N.$$

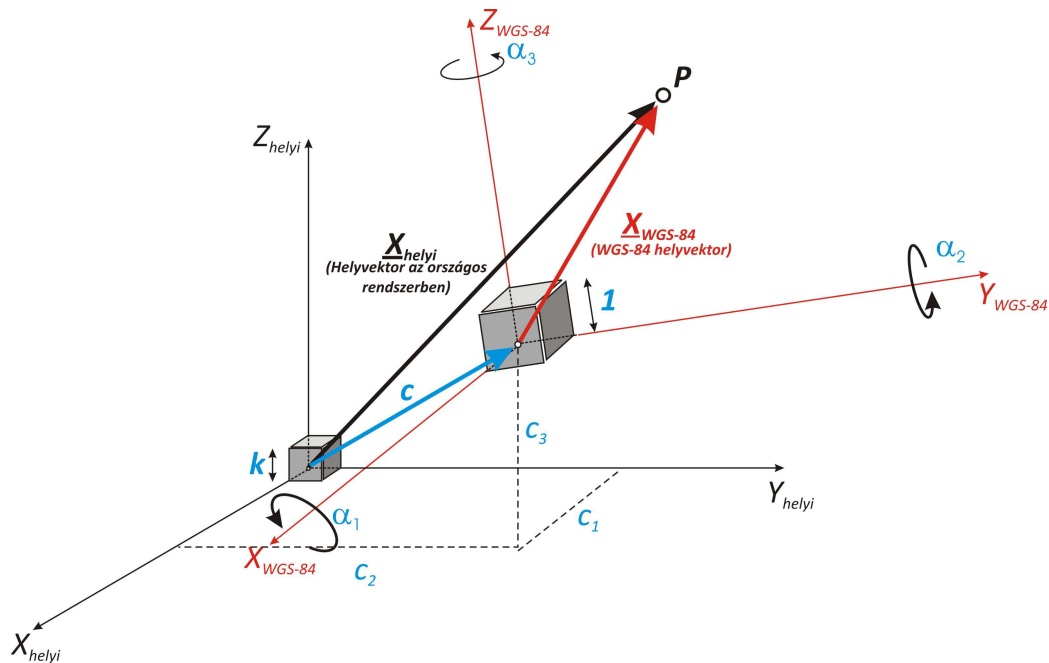
A helyi ellipszoidi koordináták, és az ellipszoid paramétereinek ismeretében most már kiszámíthatóak a helyi térbeli derékszögű koordináták:

$$\varphi_{\text{helyi}}, \lambda_{\text{helyi}}, h_{\text{helyi}} \Rightarrow X_{\text{helyi}}, Y_{\text{helyi}}, Z_{\text{helyi}}.$$

A feladatunk a továbbiakban az, hogy a térbeli hasonlósági transzformáció 7 paraméterét meghatározzuk. A transzformációhoz kellő számú közös pontra van szükség. Olyan pontokra, amelyek koordinátái mindkét rendszerben ismertek. A közös pontok száma minimum 3, hiszen 7 ismeretlenre ekkor már 9 egyenletet tudunk felírni.

A közös pontok rendszere nem más, mint az elsőgenerációs GNSS infrastruktúra, az **országos GPS ponthálózat** (OGPSH). Már említettük, hogy az 1153 OGPSH alappont mindegyike rendelkezik mind WGS-84 koordinátákkal, mind pedig EOVS koordinátákkal és Balti alapszint feletti magasságokkal. Így ezekben a pontokban mind az X, Y, Z , mind pedig az $X_{\text{helyi}}, Y_{\text{helyi}}, Z_{\text{helyi}}$ koordinátahármas is adott.

A koordináták átszámításához a *Helmert*-féle térbeli (hétparaméteres) hasonlósági transzformáció használatos (5-7. ábra). Megjegyezzük, hogy a transzformációs paraméterek kiszámítása jelentősen leegyszerűsödik, ha két közel egyállású térbeli derékszögű koordináta-rendszer között végezzük az átszámítást, ezért mindkét rendszerben X, Y, Z alakra kell hozni a koordinátákat. (Tájékoztatásul megemlítjük, hogy a „globális” és a „helyi” rendszer kezdőpontjának távolsága mindössze 92 m, a megfelelő koordinátatengelyek által bezárt szög pedig 0,3 szögmásodperc körüli érték.)



5-7.ábra. A térbeli hasonlósági transzformáció és paraméterei (C_1, C_2, C_3 eltolási paraméterek; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - elforgatási paraméterek, m - méretaránytényező)

A számítás menete:

- a kellő számú közös pont koordinátáiból kiszámítjuk a transzformációs együtthatókat (három eltolás, három elforgatás, egy méretarány-változás);
- Az ily módon meghatározott transzformációs paramétereket felhasználva, a közös pontok WGS-84 koordinátáit átranszformáljuk EOVS koordinátákká és Balti magasságokká. Mivel ezeket az adatokat az OGPSH pontokon ismerjük, így az adott és a transzformált koordináták eltéréseiből kiszámítjuk az egymásba illesztés pontosságát jellemző mennyiséget, ami egyúttal a transzformált pontok várható pontosságának mérőszáma is;
- ha a transzformáció várható pontossága kielégítő, akkor az általunk meghatározott új (nem közös) pontok WGS-84 koordinátáit is átszámítjuk az országos rendszerbe.

Megjegyezzük, hogy a hétparaméteres Helmert-transzformáció segítségével csupán az $X_{helyi}, Y_{helyi}, Z_{helyi}$ koordinátákat számítjuk ki. Ezt követően ezekből a koordinátákból meg kell határoznunk a $\varphi_{helyi}, \lambda_{helyi}$ alappelületi koordinátákat, illetve a h_{helyi} helyi ellipszoid feletti magasságot. A $\varphi_{helyi}, \lambda_{helyi}$ alappelületi koordinátákból a vetületi egyenleteket felhasználva megkaphatjuk a GPS-szel mért pont y, x EOVS koordinátáit. A h_{helyi} ellipszoid feletti magasságból levonva a geoidunduláció értékét (N), pedig a H Balti alapszint feletti magasság számítható. Így a GPS-szel mért pontokat beillesztettük az állami földmérés vonatkoztatási rendszerébe. A transzformáció pontossági mérőszámainak meghatározásánál ugyanígy járunk el. A maradék ellentmondásokat így az y, x, H koordinátákra külön-külön is kiszámíthatjuk.

A hazai tapasztalatok szerint – elsősorban az EOVS síkkoordináták torzulása és a tengerszint feletti magasságok pontatlansága miatt – az ország területére meghatározott egységes (tehát mind az 1153 közös pont felhasználásával kiszámított) paraméterkészlettel az átszámítás eredményét több deciméteres hiba terheli. Geodéziai, tehát centiméteres pontosság csak akkor érhető el, ha a transzformációs együtthatók kiszámításához a munkaterülethez legközelebbi 4-5 közös pont koordinátáit használjuk fel.

Megjegyezzük még, hogy az ismertetett módon (térbeli derékszögű koordináta-rendszerek között) meghatározott transzformációs együtthatók ellentett előjellel ellentétes irányú („helyi” → „globális”) átszámításra is alkalmasak.

Az előadás anyaga az ajánlott irodalomban:

Krauter: Geodézia; 7.1 alfejezet, 7.2.3, 7.5.2, 7.6.1, 7.6.2, 9.3.1 és 9.3.2 fejezetrész