

Arvidy Sz
51.000

**BEVEZETÉS A
GPS
TECHNIKÁBA**

FÖMI Satellite Geodetic Observatory

H-1373 Budapest

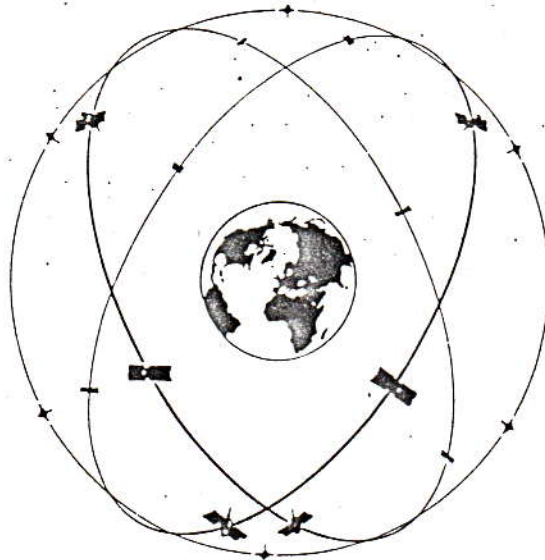
Pf.: 546

Telephone: (27) 10 980

Telex: 28-22-41



BEVEZETÉS A
GPS
TECHNIKÁBA



Szerkesztették:

Dr. Borza Tibor (4, 5, 11, 12 és 13 fejezet)

Dr. Fejes István (6 és 8 fejezet)

Dr. Mihály Szabolcs (1, 2, 3, 9 és 10 fejezet)

Első kiadás

1989 április

Előszó

A globális műholdas rendszerek kifejlesztése forradalmi változást hoz a helymeghatározás (navigáció, geodézia) technikájában és akarva akaratlan megjelenik mindennapi életünkben.

A Földmérési és Távérzékelési (FÖMI) Intézet Kozmikus Geodéziai Observatóriuma (KGO) - amelynek elsődleges feladata a műholdas helymeghatározás megismerése és annak meghonosítása - érdekelt abban, hogy hazánkban a globális műholdas helymeghatározást (GPS) felkészülten fogadják a geodézia és más érdekelt szakterületek művelői.

A KGO nemzetközi szinten is élenjáró tevékenységet folytatott és folytat ma is a GPS-t megelőző Tranzit doppleres rendszer alkalmazásában. (A két rendszer a 90-es évek közepéig párhuzamosan üzemel.) Kutatóink folyamatosan nyomon követik a GPS technika kifejlesztését, így ismereteik e gyorsan fejlődő technológiáról naprakésznek mondható. Más hazai intézményekkel együtt (Budapesti Műszaki Egyetem, Geodéziai és Geofizikai Kutató Intézet, stb.) fontosnak tartjuk az ismeretek publikálását, ismertetését minél szélesebb körben.

Az e témában magyar nyelven eddig megjelent jelentősebb cikkek száma mintegy tízre tehető. Igen bőséges viszont a külföldi irodalom, amelyben megkönnyíti a tájékozódást a KGO-ban létrehozott számítógépes szakkönyvtár amely 1989 elején már 300 cikket tartalmazott és folyamatosan bővül.

Elérkezettnek látjuk az időt, hogy magyar nyelven egy könnyen kezelhető általános ismertetőt jelentessünk meg a GPS technikáról. Tekintettel a terület rendkívül gyors fejlődésére, ezt az ismertetőt időről időre szándékunkban áll felfrissíteni, ennek megfelelően nem oldal- hanem témaszerinti számozást végeztünk. Az ismertető - főleg az ábra anyaga - nagymértékben támaszkodik az (1) irodalomra, amely jelentős szerzők nagyszerű de igen terjedelmes (600 oldal) munkája. Az ismertető végén megadjuk a GPS (angol nyelvű szakszavainak) magyar megfelelőit is, amelynek kialakításába a hazai szakemberek széles körét vontuk be.

Úgy gondoljuk megbocsájtható, ha e munka központjába a profilunknak megfelelően a GPS geodéziai alkalmazását tettük, bízva abban, hogy azért elegendő információt kaphatnak belőle más, pl. navigációs szakterületek művelői is. A GPS-el kapcsolatos minden további információ igényt, vagy együttműködési ajánlatot szívesen kielégítünk ill. fogadunk.

TARTALOMJEGYZÉK

- 1.00 Bevezetés
- 2.00 A NAVSTAR GPS általános jellemzői
 - 2.01 A GPS funkcionális felosztása
- 3.00 A GPS alkalmazásának területei
 - 3.01 Geodéziai és térképészeti alkalmazások
 - 3.02 Légi alkalmazás földmérési és térképészeti munkáknál
 - 3.03 A GPS geodéziai alkalmazásáról
 - 3.04 A geodéziai alkalmazás áttekintése a pontosság szempontjából
 - 3.05 A GPS összehasonlítása más technikákkal
 - 3.06 Szárazföldi közlekedés és hírközlés
 - 3.07 Vizi közlekedés és óceánkutató
 - 3.08 Légi közlekedési alkalmazások
 - 3.09 Navigációs alkalmazások áttekintése a pontosság szempontjából
 - 3.10 Katonai alkalmazások
- 4.00 A pálya
 - 4.01 Fedélzeti pályaadatok
 - 4.02 Pálya előrejelzés
 - 4.03 A műholdra ható erők
 - 4.04 A földi követő (üzemeltető) hálózat
 - 4.05 Pályaszámítás utófeldolgozással
- 5.00 A jelstruktúra
 - 5.01 Az üzenet formátuma
 - 5.02 Az üzenet tartalma
- 6.00 GPS vevőtípusok
 - 6.01 A korrelációs csatorna
 - 6.02 Frekvencia etalonok és órák
 - 6.03 GPS antenntípusok
 - 6.04 GPS vevő árák
- 7.00 A helymeghatározásról általában
 - 7.01 Koordinátarendszerek
 - 7.02 Relatív helymeghatározás
 - 7.03 Hálózat meghatározás
 - 7.04 A műholdas helymeghatározás alapelve
 - 7.05 Geocentrikus helymeghatározás műholdas távolságmérésekkel
 - 7.06 Relatív helymeghatározás műholdakra végzett mérésekkel
 - 7.07 Hálózatmérés több vevővel

- 8.00 A távolságmérés elve
 - 8.01 Pszeudo távolságmérések
 - 8.02 Pszeudo távolság észlelések
 - 8.03 Lekevert hordozófázis mérések
 - 8.04 Lekevert hordozófázis észlelések
 - 8.05 Folytonos hordozófázis
 - 8.06 Integrált Doppler szám
- 9.00 Megfigyelési egyenletek, hibahatások
 - 9.01 Állandó és egyéb hibák
 - 9.02 Észlelési hibák
 - 9.03 Távolsághibával ekvivalens hibák
 - 9.04 GPS geometria és pontosság
- 10.00 Feldolgozási módok, megoldások
 - 10.01 A statikus és kinematikus meghatározás fő jellemzői
 - 10.02 Egyszerű pontmeghatározás pszeudo távolságméréssel
 - 10.03 Legkisebb négyzetes kiegyenlítés egyszerű pont-
meghatározás esetén
 - 10.04 Relatív helymeghatározás pszeudo távolságmérésekből
 - 10.05 Relatív helymeghatározás fázismérésekből
 - 10.06 A GPS fázismérések differenciái
 - 10.07 Hálózat megoldás és pályajavítás
 - 10.08 A kinematikus helymeghatározás elve
- 11.00 Gyakorlati szempontok
 - 11.01 Terepi műveletek
 - 11.02 Adatfeldolgozás
 - 11.03 Az adatfeldolgozás szempontjai
- 12.00 A GPS jellemzőinek jelene és jövője
 - 12.01 A felhasználók számának alakulása
 - 12.02 A helymeghatározás jövője
- 13.00 GPS terminológia

1.00 Bevezetés

Számos földmérő szakember számára elképzelhetetlennek tűnt 10-15 évvel ezelőtt (és tűnik talán napjainkban is), hogy a kozmikus geodézia mindennapos eszközként vonuljon be a néhány km-es kiterjedésű alsógeodéziai, vagy akár néhány 100 km-es kiterjedésű felsőgeodéziai feladatok gyakorlati megoldásába, a termelésbe. Márpedig ez megtörtént, igaz, Magyarországon ma még csak részben.

A sort az Amerikai Egyesült Államok által működtetett Transit elnevezésű doppleres műholdrendszer nyitotta meg a 70-es évek elején. Ez a rendszer a műholdak fedélzetéről kibocsátott és a földi állomásokon vett frekvenciában megjelenő ún. Doppler-csúszás mérésére alapozva teszi lehetővé a földi pontok geocentrikus koordinátáinak $\pm 2-4$ m, vagy egymáshoz viszonyított helyzetének $\pm 20-50$ cm pontosságú meghatározását.

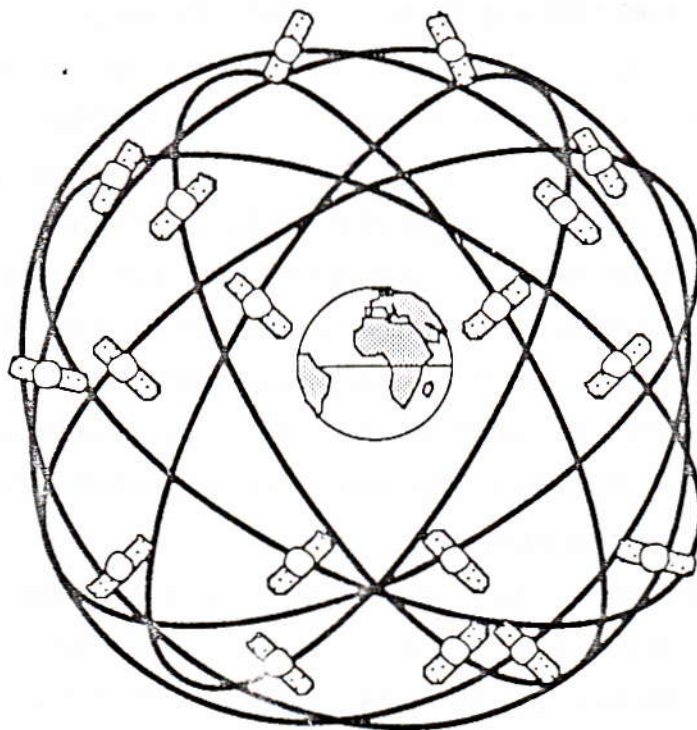
A doppleres módszert Magyarországon is nagy sikerrel alkalmaztuk a felsőrendű geodéziai hálózat korszerűsítésére. Fejlesztéseinkről és a hazai hálózati alkalmazás eredményeiről számos cikket közöltünk.

A kozmikus geodézia gyakorlati alkalmazásában lökésszerű előrehaladást jelentettek az elmúlt pár évben tervezett és bizonyos fokon megvalósult globális helymeghatározó műholdrendszerek (a továbbiakban GPS, Global Positioning System).

Ilyenek a NAVSTAR (USA), GLONASS (SZU), NAVSAT (Európai Űrkutatási Szervezet), GEOSTAR (USA), MOBILSAT (USA) és GRANAS (NSZK) elnevezésű műholdrendszerek.

A NAVSTAR GPS van a legelőrehaladottabb állapotban: műholdjainak egy részét már felbocsátották, számos nyugati cég a NAVSTAR-hoz alkalmas vevőkészüléket gyárt, a kísérleti és összehasonlító mérések javarészt megtörténtek, és a nyugati világ számos országában már termelési célokra használják.

A NAVSTAR GPS ÁLTALÁNOS JELLEMZŐI



- Űrszegmens
 - 18 műhold + 3 tartalék
 - 6 pályasík
 - 55° pályahajlás
 - 20 000 km magas pálya
- Vezérlő szegmens
- Felhasználói szegmens

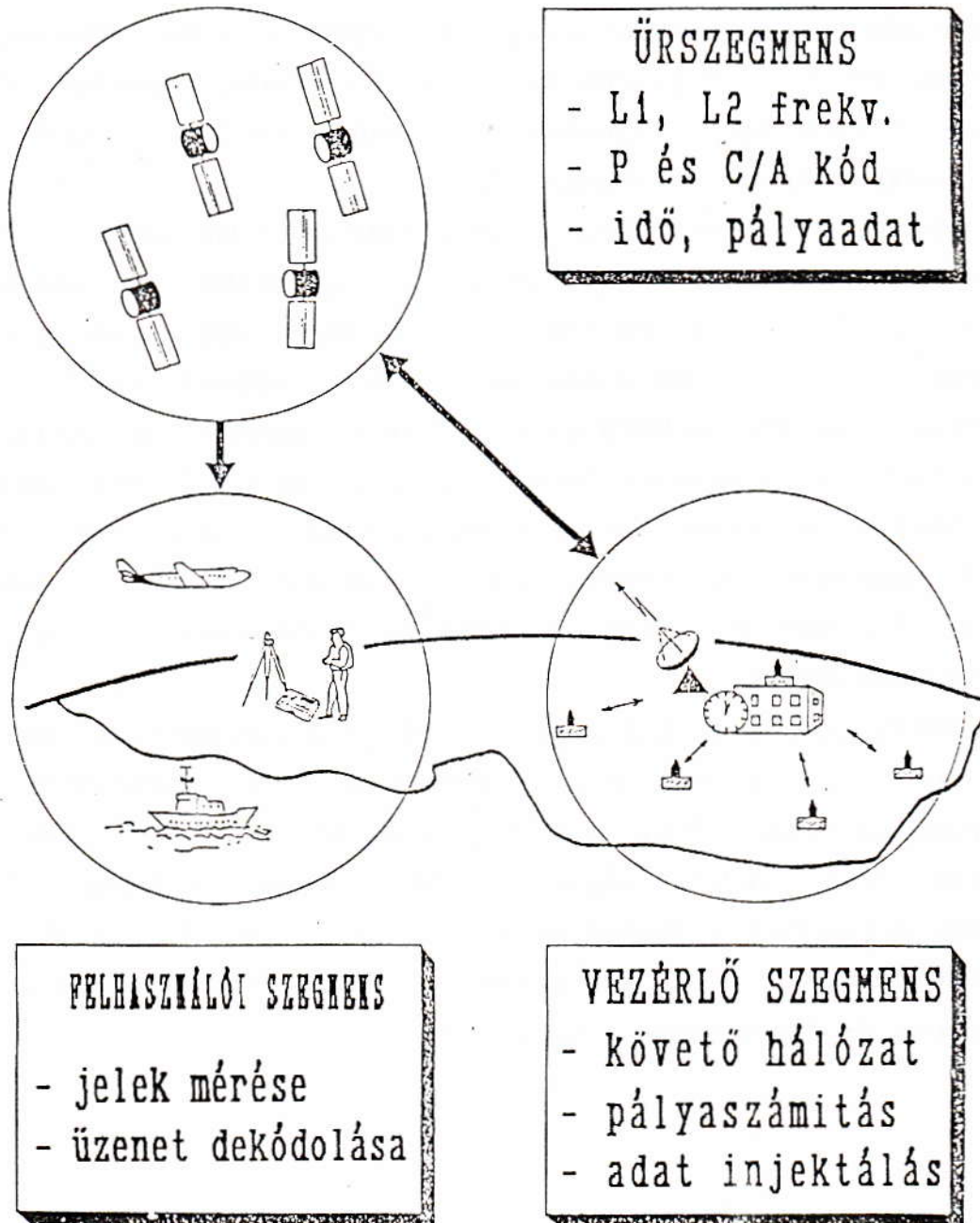
2.00 A NAVSTAR GPS általános jellemzői

A legperspektivikusabb globális helymeghatározó műholdrendszer az USA-beli NAVSTAR (Navigation Satellite Timing And Ranging, navigációs műholdas idő- és távolságmérés), amely szabatos háromdimenziós helymeghatározásra, sebességmérésre és időmeghatározásra szolgál bárhol a Föld felszínén és közelében, bármikor, folyamatosan és tetszőleges időjárási körülmények között. Álló és mozgó objektumoknál egyaránt alkalmazható.

A NAVSTAR GPS csúcstechnológiai szinten automatizált mérési és informatikai rendszer. Nagyságrendekkel gyorsabb és gazdaságosabb, mint a korábbi földi és kozmikus helymeghatározó rendszerek. Szakemberek prognózisa és a már ma is tapasztalható tények alapján a GPS-technika széles körű elterjedése és tömeges alkalmazása várható a tudomány területén és az országok népgazdasági ágazataiban, egyáltalán, a mindennapi életben (navigáció, geodézia, űrkutatás, földtudományok, természeti erőforrások kutatása, közlekedés és katonai alkalmazások). Forradalmasítja az oly mindennapos helymeghatározó méréseket.

A NAVSTAR globális helymeghatározó műholdrendszert az Egyesült Államok kormánya fejleszti a következő főbb intézmények igénye alapján és bevonásával: a Hadügyminisztérium, Közlekedési Minisztérium, NASA, NATO, Légierő, Tengerészet, Katonai térképészet (DMA), a Geodéziai Szolgálat (NGS, NOAA), a Geológiai Szolgálat (USGS) és Ausztrália. Három szegmensből áll: űrszegmens, vezérlő szegmens és felhasználói szegmens.

A GPS FUNKCIONÁLIS FELOSZTÁSA



2.01 A GPS funkcionális felosztása

Úrszegmens

A mesterséges holdak szinkron időjeleket, saját pályájuk adatait és egyéb kiegészítő információkat sugároznak két hordozó frekvencián.

A teljes kiépítettség stádiumában a rendszer 18 db működő (+3 tartalék) műholdból áll, 6 egyenletesen elosztott pályasíkban. A pályahajlás az egyenlítőhöz 55° , a földfelszín feletti magasság 20 200 km, a keringési idő 11 óra 58 perc. Ilyen pályaadatok mellett minden NAVSTAR-hold max. 5 órán keresztül bármely földi pont horizontja felett található. A Föld bármely pontján egyszerre legalább 4 hold látható.

A teljes kiépítés 1992-re várható. A felbocsátott holdak közül 1989 áprilisában 7 működött.

Vezérlő szegmens

Feladata a NAVSTAR-holdak szolgálatszerű követése, szabatos pályaszámítás, adattovábbítás és -injektálás és a szatelliták napi felülvizsgálata.

A vezérlő szegmensben 5 követő állomás működik, amelyek közül 3 adatinjektálást is végez, 1 pedig a vezérlő központ (USA, Colorado Springs). A követő állomások az észleléseket a vezérlő központba küldik, amely pályaszámítást végez, óra-korrekciókat határoz meg, összeállítja a szatellitaüzenet adatait, és ezeket injektálás céljából az injektáló állomásokhoz továbbítja. Ez utóbbiak feladata a NAVSTAR-holdak feltöltése friss adatokkal.

Felhasználói szegmens

A vevőkészülékek és a hozzájuk tartozó feldolgozó programok összessége. A NAVSTAR-holdak vételére alkalmas GPS-vevőkészülékek a Föld felületén egyhelyben álló vagy mozgó és a földközeli tér-ségben mozgó objektumok helyzetének, mozgási sebességének meghatározására és időrendszerének illesztésére szolgálnak. Fogadják a NAVSTAR-holdak mérőjeleit és üzeneteit, ezeket elemzik, és valamilyen szinten feldolgozzák.

Sokféle GPS-vevőkészüléket készítenek a cél, az operativitás, a bonyolultság és a pontosság függvényében. Vannak navigációs és/vagy geodéziai célú műszerek, egyfrekvenciás (L1) vagy kétfrekvenciás (L1 és L2) vevők, továbbá P és C/A kód vagy csak C/A kód vételére alkalmas kódkorreláló vagy a kódokat nem elemző ún. kód-nélküli vevőkészülékek.

A GPS ALKALMAZÁSÁNAK TERÜLETEI

SZÁRAZFÖLDI ALKALMAZÁS

Geodézia

Közlekedés és hírközlés

VIZI ALKALMAZÁS

Geodézia

Közlekedés

Óceánkutató

LÉGI ALKALMAZÁS

Geodézia

Közlekedés

ÜRBELI ALKALMAZÁS

TURISZTIKAI ALKALMAZÁS

KATONAI ALKALMAZÁS

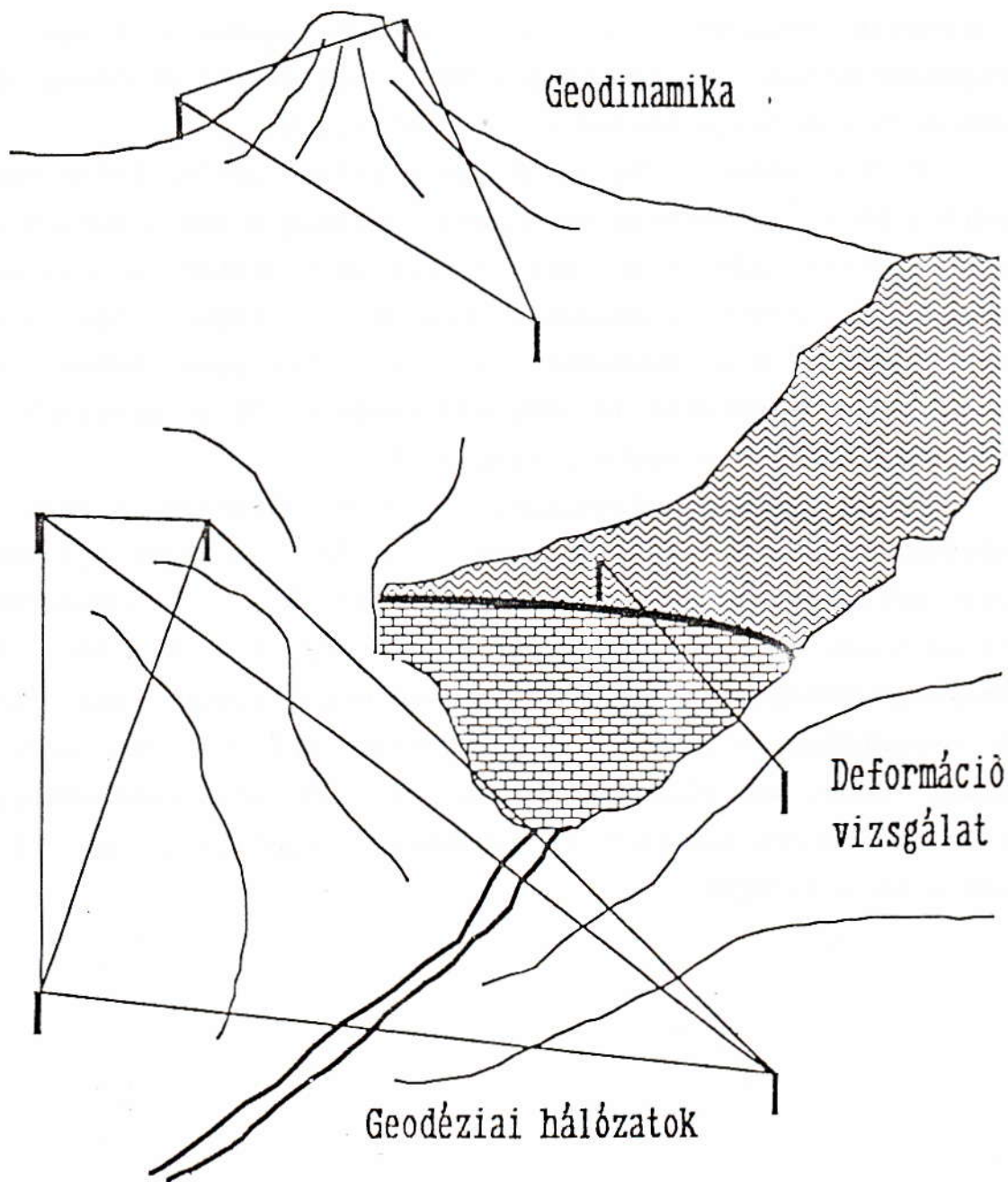
3.00 A GPS alkalmazásának területei

A kozmikus eszközökre alapozott helymeghatározó rendszerek (köztük a NAVSTAR GPS) leglényegesebb és egyedülálló tulajdonsága, hogy a helymeghatározást szolgáló mérőjelek a föld bármely pontján bármelyik időpontban a felhasználó rendelkezésére állnak. Ezáltal megalapozottan várható, hogy a GPS a teljes kiépítettség állapotában a felhasználók széles körét alakítja ki.

Feltételezve a GPS vevők meglehetősen széles felhasználói vásárlói körét, a verseny és a gazdaságosság a vevők nagyon alacsony árához vezet. Állítható, hogy a vevő árak erőteljes csökkenésének nincsen technológiai akadálya. Csupán az a kérdés, hogy a fejlesztés költségei hány vevőkészülékre oszthatók szét. Néhány vevőgyártó cég már megcélozta az 1000 \$US (vagy annál is olcsóbb) árú vevők nagy szériában történő gyártását.

A GPS térbeli helymeghatározások alkalmazásai nagyon széleskörűek, ami egyben olcsó vevőket is jelent. A GPS-t úgy emlegetik, mint erőteljesen terjedő technikát - ugyanis az űrmódszerek közül ez az első, amely az egész világra kiterjedően lehetővé teszi a helymeghatározást. Szükséges azonban megemlíteni, hogy - amint azt a bevezetőben is jeleztük - a NAVSTAR GPS mellett kifejlesztés alatt vannak más globális helymeghatározó műholdrendszerek, amelyek esetenként bizonyos alkalmazási területhez jobban illeszkednek mint a NAVSTAR.

GEODÉZIAI ÉS TÉRKÉPÉSZETI ALKALMAZÁSOK



3.01 Geodéziai és térképészeti alkalmazások

A GPS segítségével történő nagy pontosságú fázisméréseket valamely kedvezően megválasztott kiegyenlítési-adatfeldolgozási módszerrel feldolgozva olyan eredményeket kapunk, amelyek a geodéziai és térképészeti feladatok széles körét kielégítik:

- földmérés, kataszteri felmérés,
- geodéziai hálózatok létesítése
- helyi deformációk követése
- globális deformációk követése, geodinamikai feladatok megoldása.

Földmérés, felmérés

A pontok egymáshoz viszonyított helyzetét, 10^{-4} relatív pontossággal kell ismerni. A GPS erre könnyedén képes. Hogy a GPS elterjedjen ezen a területen, teljesen automatizált helyszíni feldolgozásra van szükség. Ilyen néhány éven belül minden GPS vevőben lesz.

Geodéziai hálózatok

Felsőrendű és alsóbbrendű hálózatok jönnek szóba. A hálózati pontok egymáshoz viszonyított helyzetében megengedhető relatív hiba a 20-100 km-es kiterjedéseknél általában $5 \cdot 10^{-6}$ - $1 \cdot 10^{-6}$. Ez a pontosság a GPS fázismérési eredmények felhasználásával és azok utólagos feldolgozásával szabvány módon elérhető. Alsóbbrendű munkák is gazdaságosan végezhetők GPS-szel.

Helyi deformációk követése

Pontossági követelmény: 0.1-1 cm néhány km-en belül. GPS módszer alkalmazása esetén az antenna fázisközpont változásait és a felületi hullám visszaverődések által okozott hibákat is figyelembe kell venni.

Globális jellegű deformációk követése (pl. lemeztektonika)

Kontinentális kiterjedésnél 10^{-7} - 10^{-8} relatív hiba engedhető meg. Ennél az alkalmazásnál nagy pontosságú pályamodellezésre és pályameghatározásra, valamint a légköri hatások szélső pontosságú figyelembevételére kell különös figyelmet fordítani.

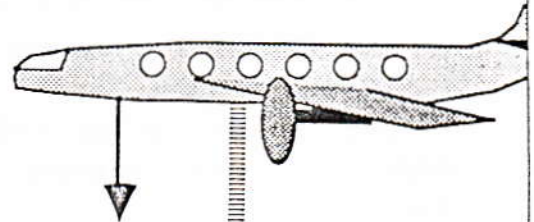
LÉGI ALKALMAZÁS FÖLDMÉRÉSI ÉS TÉRKÉPÉSZETI MUNKÁKNÁL

Kamera helymeghat.
Navigáció

Fotogrammetria



Gravimetria
és gravitációs
radiometria



Mélységmérés



3.02 Légi alkalmazás földmérési és térképészeti munkáknál

Ezen a téren a GPS feladata elsősorban a légi érzékelő és mérő berendezések helyének meghatározására és navigálásra szolgál.

A légi fényképészetben a kamera térbeli helyzetének néhány tízméteres pontosságú meghatározását a GPS könnyedén képes biztosítani. A távérzékelő berendezéseknek a GPS segítségével és utófeldolgozásban történő nagypontosságú helymeghatározása és tájékozási elemeinek meghatározása felválthatja a légiháromszögelést és feleslegessé teheti a földi geodéziai ponthálózatot. Ilyen alkalmazások a pontossági követelmény, méretaránytól függően, 0.5 m - 25 m, amire a GPS képes.

Fedélzeti lézer segítségével történő profilozás a földfelszín közvetlen digitális felmérését (digitális terepmodell létrehozását) szolgálhatja, ha a lézer berendezés magasságát 0.5-1 m, vízszintes helyzetét pedig néhány méteres pontossággal tudjuk meghatározni. A NAVSTAR GPS segítségével ez a pontosság utófeldolgozás folyamán biztosítható.

Körülbelül ugyanezt a pontosságot kell biztosítani légi gravimetriai és gravitációs gradiometriai méréseknél. E téren a GPS kiegészítésképpen biztosítja a fedélzeti berendezés sebességének meghatározását is, ami a gravitációs adatokban eszközölendő Eöt-vös redukáláshoz kívánalom.

A lézeres mélység meghatározás és a radaros képkészítés pontossági követelményei a fentieknél alacsonyabbak, amit a GPS könnyedén képes kielégíteni.

3.03 A GPS geodéziai alkalmazásáról

Bizonyosra vehető, hogy a geodéziai alaphálózatok létrehozása, fenntartása és sűrítése terén a Transit doppleres rendszert felváltja a GPS. Néhány száz km-es hálózati kiterjedésnél a multi-lokációs doppleres relatív helymeghatározás pontossága 2-5 napos megfigyelés alapján néhány dm. Ezzel szemben a GPS segítségével már néhány tíz km-es hálózati kiterjedésnél is elérhető az 1:1 000 000 relatív pontosság, a Transittól lényegesen rövidebb idő, mintegy félóra alatt. A hagyományos geodéziai mérési technika elmarad a GPS-technikától abban is, hogy lassú, feldolgozása sok erőt köt le, és sokáig tart, továbbá hibaterjedési szempontból kedvezőtlenebb, mint a GPS, nagy kiterjedéseknél a pontosság jelentősen csökken.

A hagyományos módszerektől eltérően, a GPS segítségével létesített alaphálózatokban nincs szükség a hálózati pontok közötti összelátásra, és a hálózat (a háromszögek) alakja mentes a megkötésektől. Magas jelek építése tehát szükségtelen. A GPS segítségével történő hálózatfejlesztési módszer lehetővé teszi, hogy a hálózati pontokat könnyen megközelíthető helyeken, pl. utak mentén létesítsük. Mindez nagyon sok idő és pénz megtakarítását teszi lehetővé.

A GPS-módszerrel történő hálózatfejlesztésnél NAVSTAR-holdak pályáját elegendő 20 m pontossággal ismerni ahhoz, hogy a hálózatban 1:1 000 000 relatív pontosságot elérhessük. A jelenlegi fedélzeti pályaadatok pontossága a legtöbb földmérési igényt kielégíti, bár a pályapontosság esetenként csökkenhet anélkül, hogy a felhasználó erről külön értesítést kapna. A felsőgeodéziai hálózati munkáknál az is elegendő, ha a koordinátákat utólagos feldolgozásból kapjuk meg. Ezért elegendő és a pontosság szempontjából célszerűbb is, ha utólagosan számított pályaadatokat használunk, amely egy rendszeresen működő GPS követő hálózat-szolgálat méréseiből nyerhető.

Már az eddigi GPS-gyakorlat is bebizonyította a nyugati országokban, hogy a NAVSTAR GPS műholdmegfigyelésekből levezetett relatív helymeghatározási adatok belső pontossága jobb, mint azé a geodéziai hálózaté, amelyhez csatlakozik. Ez az ellentmondás a GPS-eredmények és a hagyományos úton kapott pontkoordináták között nyilván még sok gondot okoz a geodétáknak. El kell-e rontani kiegyenlítési technikával a GPS-eredményeket, hogy a hagyományos keretekbe illeszkedjenek? Valószínű szükség lesz arra, hogy a geodéziai alaphálózatokat teljes egészében merevítsük illetve újra meghatározzuk a GPS segítségével.

Mérnökgeodéziai hálózat, kataszter, térképezés

A GPS-re alapozott polgári földmérési alkalmazások a mérnökgeodézia, a geofizika, a kataszter és térképezés területén tömegesen várhatók. A GPS a kataszteri rendezésekkel illetve felmérésekkel kapcsolatos földmérési munkák egyik ideális módszere lehet. A földmérés ezen részterületein a relatív hiba hagyományosan 1:10 000-1:100 000 mozog.

Az ezeken a részterületeken működő földmérő szakemberek nem rendelkeznek szatellitageodéziai tapasztalatokkal, számukra a szatellitamódszerek ismeretlenek. Nem várható tehát, hogy a GPS bevezetését ilyen alapon szorgalmazzák. A gazdaságosság viszont kényszerítő erő lesz. A GPS-technológiával szembeni fenntartásaikat akkor tudjuk eloszlatni, ha a földmérőknek alkalmat adunk meggyőződni arról, hogy a GPS segítségével a helymeghatározás a kívánt pontossági szinten hajtható végre a korábbi módszereknél rövidebb idő alatt, hatékonyabban és olcsóbban.

A hagyományos technológia és a GPS közötti verseny megítélésakor még a következő szempontokat célszerű figyelembe venni: a műszerek ára, a technológia nehézségi foka és a termelékenység.

A technológia nehézségi foka: A GPS-technológia legalább olyan könnyű és egyszerű, mint a teljesen automatizált hagyományos mérési módszerek. A GPS-észlelés és feldolgozás nem kíván magas szintű előképzettséget és gyakorlatot. A vevőkészülékben vagy a hozzátartozó hordozható terepi számítógépen a feldolgozó program rendelkezésre áll, és a helyszínen azonnal szolgáltatja a koordinátákat, a kezelőszemélyzet minimális beavatkozása mellett. A szóban forgó szakterületeken 1:10 000-1:100 000 relatív pontosság elégséges, amely max. 0,2-2 km pályahibát enged meg. Ez biztosítható a fedélzeti pályaadatokkal, külön pályaszámítási szolgálatra (követő hálózatra) nincs szükség. Elégséges továbbá valamely egyszerűsített feldolgozó szoftvert alkalmazni. Célszerű megjegyezni, hogy mindez, a kezelés egyszerűsége mellett, árcsökkentő hatással is van.

A termelékenység vizsgálatánál a következőket célszerű tekinteni. Illesztőpontméréseknél és olyan pontmeghatározásoknál, ahol a pontok közötti összelátásra egyébként nincs szükség, a leghatékonyabb a GPS relatív helymeghatározás, vagy pl. fúrótornyok esetén, egyetlen vevővel történő egyszerű pontmeghatározás. Ezzel szemben a hagyományos mérési módszerek általában igénylik a pontok közötti összelátást, ami a végcélt tekintve egyébként szükségtelen. A geofizikai felmérésekhez, ipari kitermelésekhez és különféle művelési határok felméréséhez kialakítandó helyi hálózatok alakjára nincsenek geometriai megkötéseink, a pontok közötti ösz-

szelátás elvileg szükségtelen. A hagyományos mérési módszerek alkalmazásakor a kialakítandó helyi hálózat pontjainak kedvező geometriát kell képviselniük, közöttük biztosítani kell az összelátást. A GPS-technológia alkalmazásakor ezekre nem kell tekintettel lennünk, ami jelentős termelékenységnövekedéshez vezet. Városméréseknél centrális hálózat kifejlesztésére szintén előnyösen alkalmazható a GPS. Megjegyzendő azonban, hogy az igen nagy tömegben előforduló és egymáshoz közeli sarokpontokat célszerűbb hagyományos földi módszerrel meghatározni.

Általában a GPS alkalmazása mellett szól az is, hogy segítségével magasságmeghatározás is végezhető valamely tetszőleges ellipszoid felett. A geometriai szintezésben használatos ortometrikus magassághoz úgy juthatunk el, hogy a GPS-féle ellipszoidi magasságból levonjuk az alkalmazott ellipszoidra vonatkozó geoidmagasságot. Ez egyfajta közhasznú geoidtérkép polgári forgalmazását teszi szükségessé a jövőben.

A GPS vitathatatlan előnyei mellett célszerű arra is kitérni, hogy a GPS-álláspontok közötti távolságnak van egy olyan kritikus határa, amely alatt a GPS-t nem ajánlatos alkalmazni részben a relatív pontosság, részben pedig a termelékenység csökkenése miatt. Ez a határ ma még néhány km, amely a módszer elterjedésével várhatóan együttjáró tökéletesedés miatt a jövőben csökkenni fog.

Geodéziai mérések kéregmozgás vizsgálatához

A földrengési folyamatok, a lemeztektonika, a hegyképződési folyamatok és a vulkánok viselkedése megértéséhez ill. értelmezéséhez a földfelszínen geodéziai méréseket hajtanak végre a világ azon térségeiben, ahol a fenti jelenségek előfordulása várható. Ezek a jelenségek általában néhány ezer km-en belül, de gyakran csak 30-300 km kiterjedésben fordulnak elő. A geodéták helyzetváltozásokat határoznak meg ismételt mérések alapján. Általában követelmény, hogy a relatív helyzet meghatározásának hibája ne haladja meg az 1:300 000 - 1:10 000 000 (100 km-ként néhány cm) értéket.

A változások vizsgálatához egyik legalkalmasabb módszer a lézeres szatellitamegfigyelés és a VLBI-technika. Minden előnyük ellenére azonban 30-300 km sűrűségű hálózatok kialakítására nagyon gazdaságtalanok lennének. A nagy távolságoknál alkalmas lézer és VLBI, valamint a kis távolságoknál szóbjöhető hagyományos mérések mellett a GPS-nek döntő szerep jut majd a közepes kiterjedésű vízszintes kéregmozgási hálózatok mérésében.

Fontos szerephez jut a GPS a magassági változások mérésekor is. Költségei már néhány km távolságnál is kisebbek mint a precí-

ziós szintezése. Nagy kiterjedéseknél és nagy magasságkülönbségek mérése esetén (pl. hegyvidék) pedig a GPS-nek a pontossága felülmúlja a hagyományosét.

A GPS alkalmazásának néhány érzékeny pontja

Az előzőekből is látható, hogy a NAVSTAR GPS-t számos előnye alkalmassá teszi a földmérés különféle ágaiban jelentkező feladatok megoldására. A geodéziai alaphálózatokban és a kéregmozgási vizsgálatokban történő alkalmazásnál azonban - vagyis ott, ahol nagyobb kiterjedésekről és szélsőséges pontossági igényekről van szó - néhány hibaforrás külön figyelmet érdemel. Ilyenek a refrakció hatása és a pályaadatok hibája.

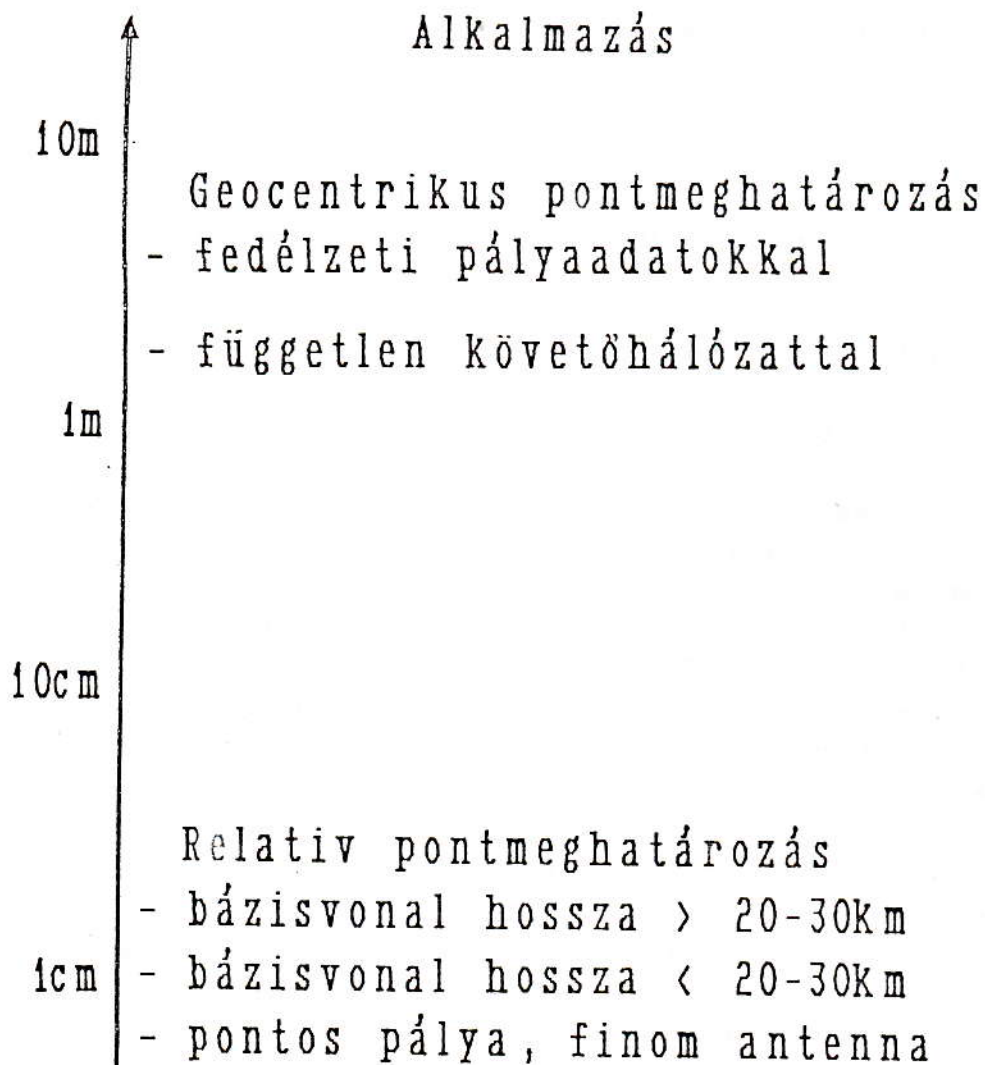
A hullámterjedést az ionoszféra és a troposzféra hatása befolyásolja. Az ionoszférikus hatás frekvenciafüggő, és a mért távolságot a körülményektől függően 5-150 m-re torzíthatja. Két frekvencián végzett észlelések segítségével e hatás legnagyobb része korrekcióba vehető a fázismérésnél és a pszeudó távolságmérésnél egyaránt. A maradék hatás általában csak a különleges pontossági igényű feladatoknál okozhat némi problémát és akkor is csak kb. 200 km bázisvonal hosszán felül. Gyakori az olyan vevőkészülék, amely egy frekvencián észlel. Ilyen esetben az ionoszféra hatása egy, a szatellitaüzenetből nyerhető durva ionszférikus modell segítségével vehető korrekcióba. A hibahatás 20-30 km-es bázisvonalon belül nem jelentős.

A troposzférikus hatás az előzőnél kisebb torzuláshoz vezet, nem frekvenciafüggő, és elég jól modellezhető. Ha a troposzférikus modellhez földfelszíni meteorológiai adatokat használunk, akkor az adó-vevő ferde távolságban maradó hatás általános esetben nem haladja meg a 3-4 cm-t. Ez azonban már közepes pontossági igényű relatív helymeghatározáskor is zavaró lehet.

A relatív helymeghatározás hibája a pályaadatok hibájával arányosan növekszik. Ha a termelésben működtetett GPS-vevők alkalmatlanok a szatellitaüzenet dekódolására, vagy a geodéziai pontosság megkívánja, akkor a néhány m pontosságú pályaadatokat külön megszervezett regionális hálózatból szükséges biztosítani.

GEODÉZIAI ALKALMAZÁS ÁTTEKINTÉSE A PONTOSSÁG SZEMPONTJÁBÓL

Pontosság



3.04 Geodéziai alkalmazások áttekintése a pontosság szempontjából

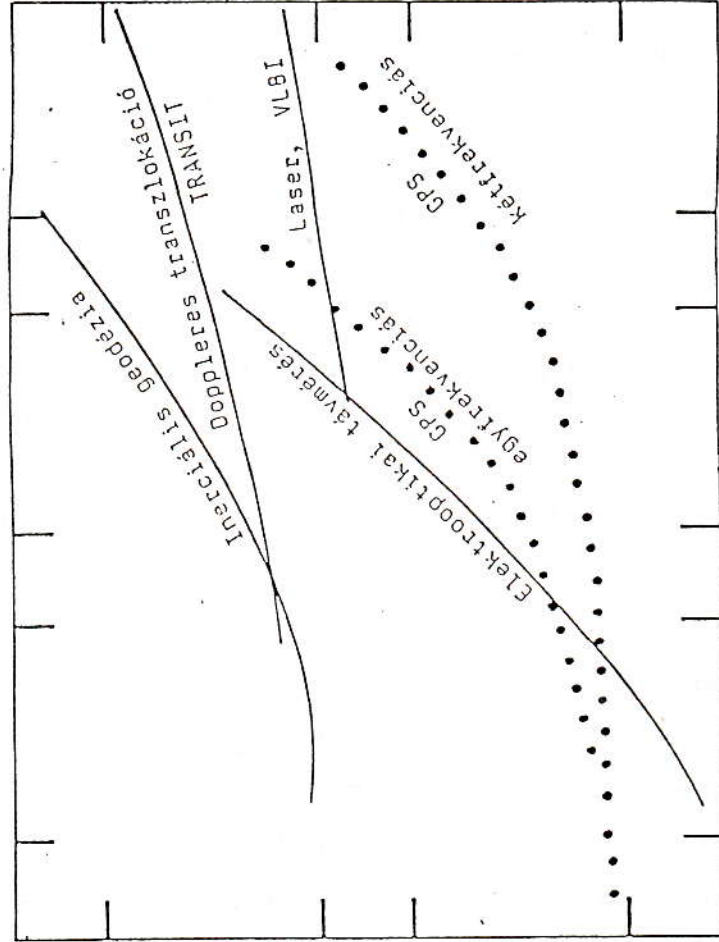
A geodéziai helymeghatározás több nagyságrenddel nagyobb pontosságot kíván, mint a navigáció. Ezért a GPS geodéziai alkalmazásakor a cm-es pontosságú fázismérési módszer fontosabb, mint a néhány cm-es pontosságú pszeudó-távolságmérés. Ne tévessze meg tehát a földmérőket a P kód "pontos" megnevezése, és az se riasszon el, hogy ez a kód titkos. A P-kódú pszeudó-távolságmérés operatív, gyors és egyszerű valósidejű feldolgozást lehetővé tevő eszköz. Ezért fontos a különleges igényű katonai célú navigációban, a mozgó objektumok helyének meghatározásakor és a NAVSTAR-holdak pályájának pontos bemérésekor. E területeken tényleg a pontos mérés szerepét tölti be, de nem vetekszik a fázismérési módszer pontosságával.

A pályaadatokra viszont a relatív meghatározásoknál is szükség van. Honnan és hogyan nyerhetők a NAVSTAR-holdak pályadatai? Az ún. almanach elnevezésű durva pályaadatok szatellitaüzenetből vagy postai úton nyerhetők, amelyekkel csökkentett pontosságú egyállomásos vagy pontos relatív helymeghatározás végezhető. Az utófeldolgozásból nyert pályaadatok pontosabbak. Segítségükkel pontosabb egyállomásos és különösen pontos relatív helymeghatározás végezhető. Ilyen pályaadatokkal a NAVSTAR-vezérlőközpont rendelkezik, de beszerzés valójában a ma már régiókban működő követőhálózatok központjaitól lehetséges.

A GPS ÖSSZEHAISONLITÁSA MÁS TECHNIKÁKKAL

Pontosság (m)

1.00
0.50
0.10
0.05
0.01



D (km)

1 5 10 50 100 500

3.05 GPS összehasonlítása más technikákkal

Az elektrooptikai távmérőkkel és iránymérésekkel kombinált relatív helymeghatározás pontossága 1:100 000 - 1:500-000 között van néhányszor tíz km-es kiterjedésig. Előnye ennek a technikának, hogy műszerei viszonylag olcsóak, viszont komoly korlátot jelent, hogy szükség van a mérendő pontok közötti összelátásra.

A Transit mesterséges holdak doppleres észleléseiből történő relatív helymeghatározás pontossága néhány dm, amely közelítőleg független a távolságtól. A pontok között összelátást nem igényel. Hátránya, hogy lassúbb, mint az inerciális geodéziai módszer, és 10-20 km alatt nem éri el az elektrooptikai távmérők és más földi mérési módszerek pontosságát.

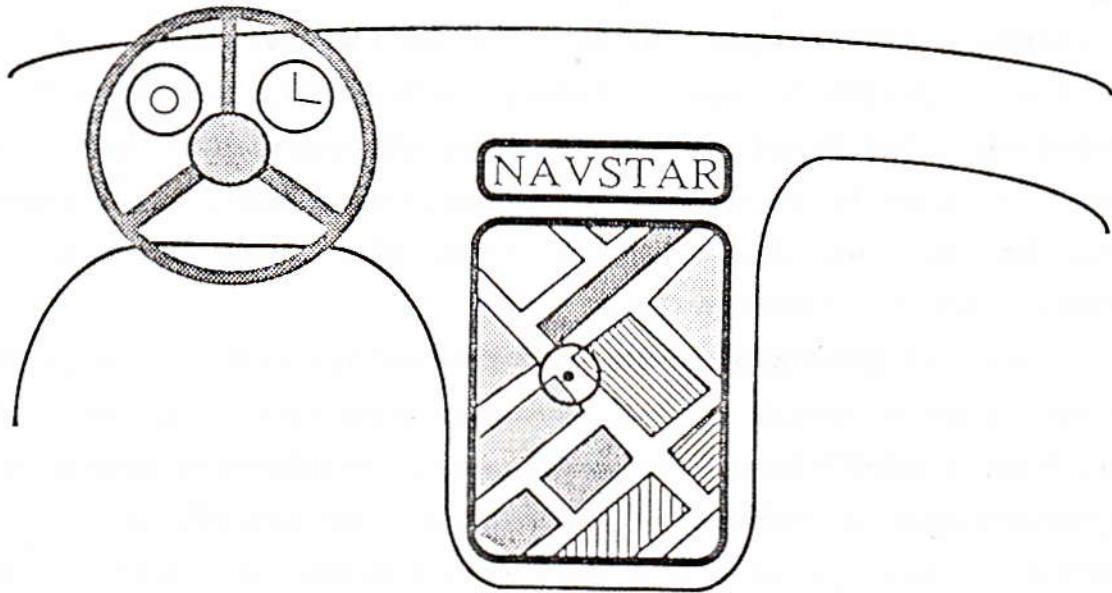
Az inerciális geodéziai technika gyorsabb, mint a hagyományos. Előnye, hogy a pontok közötti összelátásra nincs szükség. Hátránya, hogy a mérőfelszerelés nagytömegű, és műszerei nagyon drágák. Magyarországon a geodéziai gyakorlatban nem használjuk.

A GPS-technika egyesíti a hagyományos földmérésre jellemző pontosságot a szatellitageodéziai módszer kényelmével.

Előnyei a következők:

- az egymáshoz viszonyítva meghatározandó pontok közötti távolságtól is függő 1:10 000 000 - 1:500 000 relatív pontosság,
- térbeli (háromdimenziós) helymeghatározási módszer,
- a pontok között nincs szükség összelátásra, a költséges jelek építése szükségtelen,
- nagyhatékonyságú, ami egyben az egy pontra eső fajlagos költségek csökkentését eredményezi.

SZÁRAZFÖLDI KÖZLEKEDÉS ÉS HIRKÖZLÉS



NAVIGÁCIÓ

- Segélyszolgálati járművek
- Közlekedéshatósági járművek
- Kereső mentőszolgálat

KÖVETÉS

- Járművek állományának mozgása

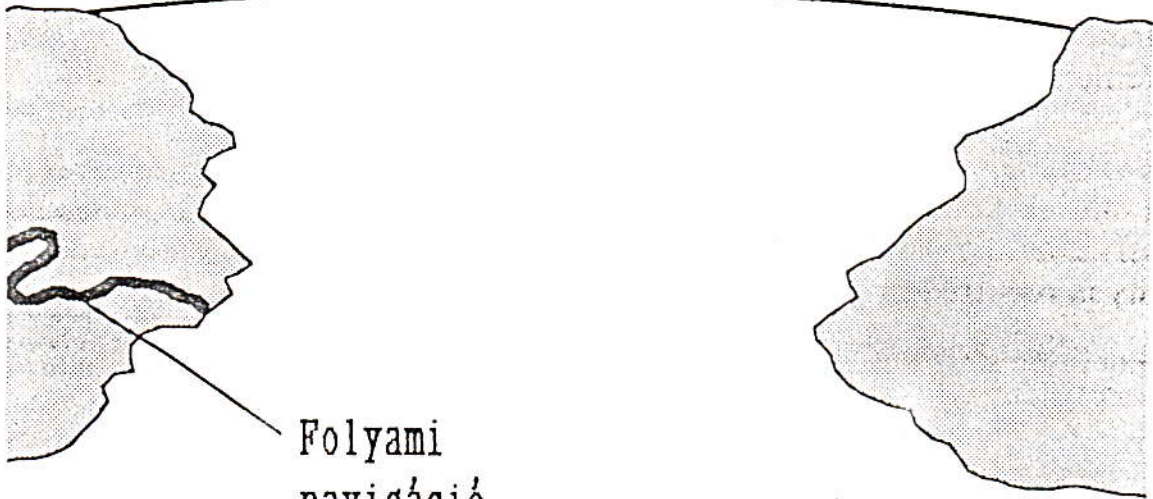
3.06 Szárazföldi közlekedés és hírközlés

A GPS helymeghatározás népszerűsége a polgári közlekedésben és szállításban a vevőberendezések árának jelentős csökkenéséhez vezet az elkövetkező években. A járművek GPS segítségével meghatározott helyzetének (útvonalának) automatikus megjelenítése a számítógépek képernyőjén kezelhető digitális térképeken lehetővé teszi a mozgó járműpark állandó figyelését, ill. az erre a célra szolgáló manuális módszerek felváltását a korábbiaknál gyorsabb, biztonságosabb és gazdaságosabb módszerrel. Ez különösen a segélyszolgálati járművek, közlekedés rendszer és kereső-mentőszolgálat esetén jelent majd nagy előrelépést.

A mozgó járművek helyzetének követése akkor lehetséges, ha a járművek a GPS vevők mellett automatikus rádióadóval is rendelkeznek. A GPS vevővel mért és meghatározott földrajzi helyzet adatait a rádióadóval a diszpécsterszolgálathoz továbbítják és képernyőn megjelenítik. Teherautók, autóbuszok és taxikocsik mozgásának folyamatos és automatikus követése válik lehetővé.

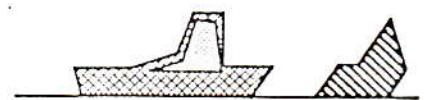
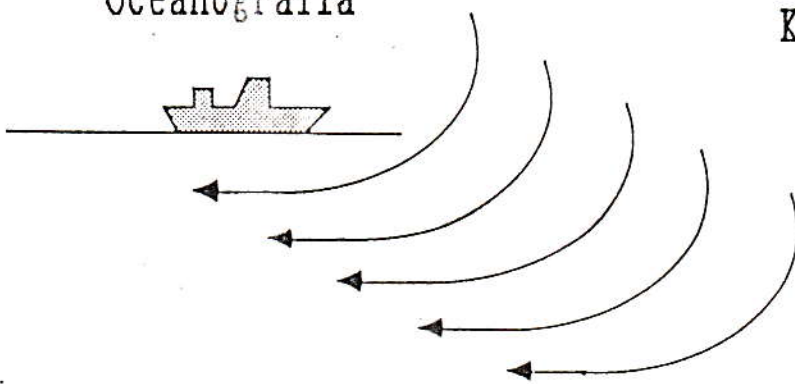
VIZI KÖZLEKEDÉS ÉS ÓCEÁNKUTATÁS

Tengeri
navigáció



Folyami
navigáció

Óceánográfia



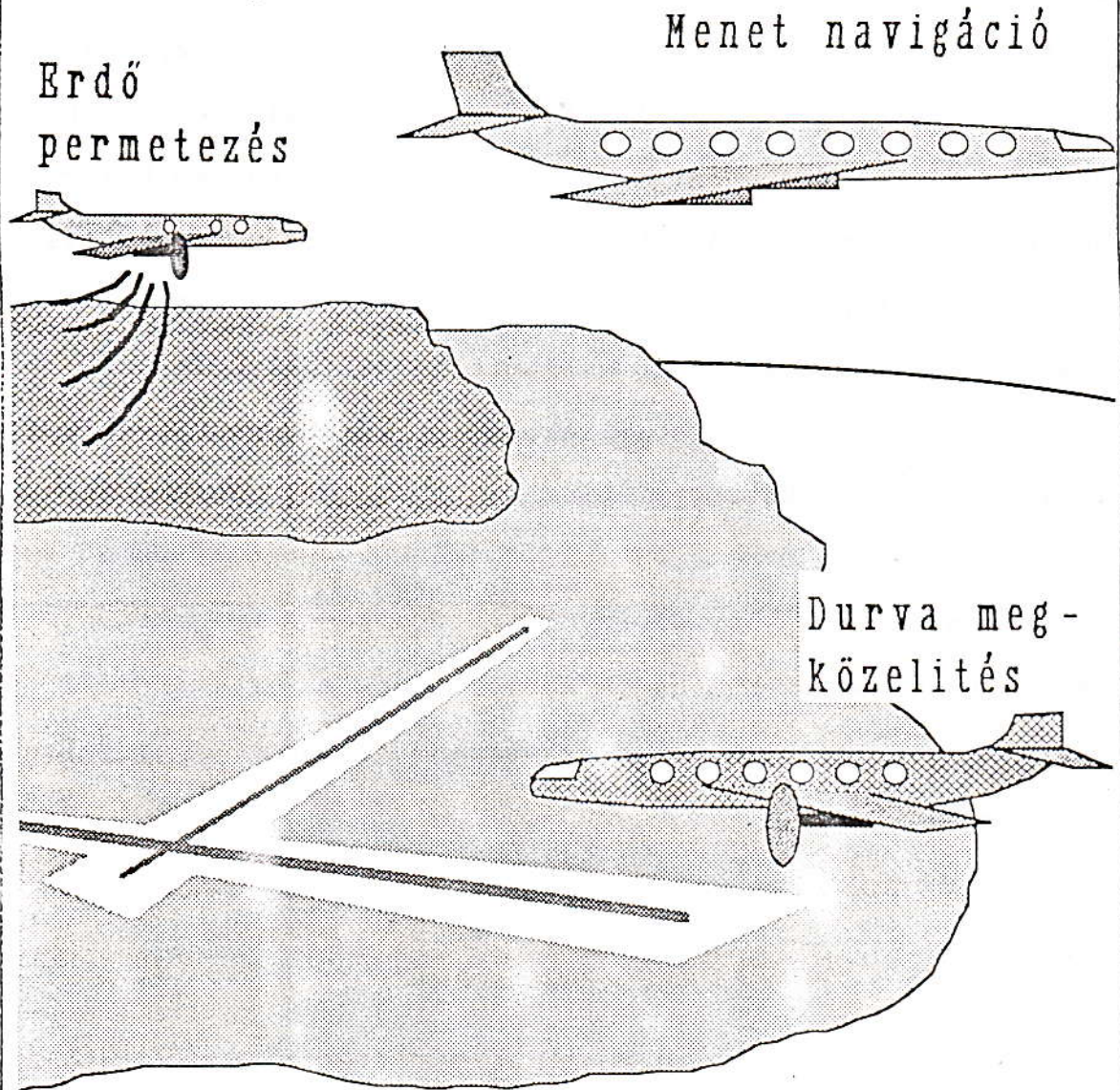
Keresés és mentés

3.07 Vízi közlekedés és óceánkutatás

A GPS vízi navigáció ideális eszközévé válik, amint a NAVSTAR rendszer olyan fokra kiépül, amely a kétdimenziós helymeghatározásra alkalmas. A vízi navigáció pontossági igénye néhány méter a parti, kikötői és folyami navigálás esetén és néhány száz méter a tengeri navigálásnál. A NAVSTAR GPS legfőbb előnye az, hogy mindenféle vízi közlekedési manőverhez egyszerű rádiós helymeghatározó rendszerként használható. A pszeudó-távolság és a fázis mérések eredményeinek pontos feldolgozásával a parti és a folyami navigálás is megoldható az eddig használt bóják mellőzésével. A parti vizeken a keresés és a segélyszolgálat hatékonyabbá válik a navigációs pontosság következtében.

A fizikai óceánográfiai feladatok megoldásához szükséges helymeghatározási követelményeket a GPS képes teljesíteni. A GPS fázisméréses módszer a hajók sebességének a meghatározási pontosságát növeli, amire a manapság végzendő óceánográfiai feladatoknál szükség van.

LÉGI KÖZLEKEDÉSI ALKALMAZÁSOK



3.08 Légiközlekedési alkalmazások

Az, hogy a GPS kaphat-e kizárólagos szerepet a repülési navigálásban, attól függ, hogy képes-e folyamatosan és redundanciával biztosítani a helymeghatározást. A jelenlegi NAVSTAR kiépítettségénél a kizárólagosság nem biztosítható. Ugyanakkor a GPS az integrált légi navigációs rendszerek részeként hasznosítható. A GPS segítségével a repülőgépes helymeghatározás időnként "felújítható", ami pontosság tekintetében jelentősen a rádiópozicionáló rendszerek fölé helyezi a GPS-t.

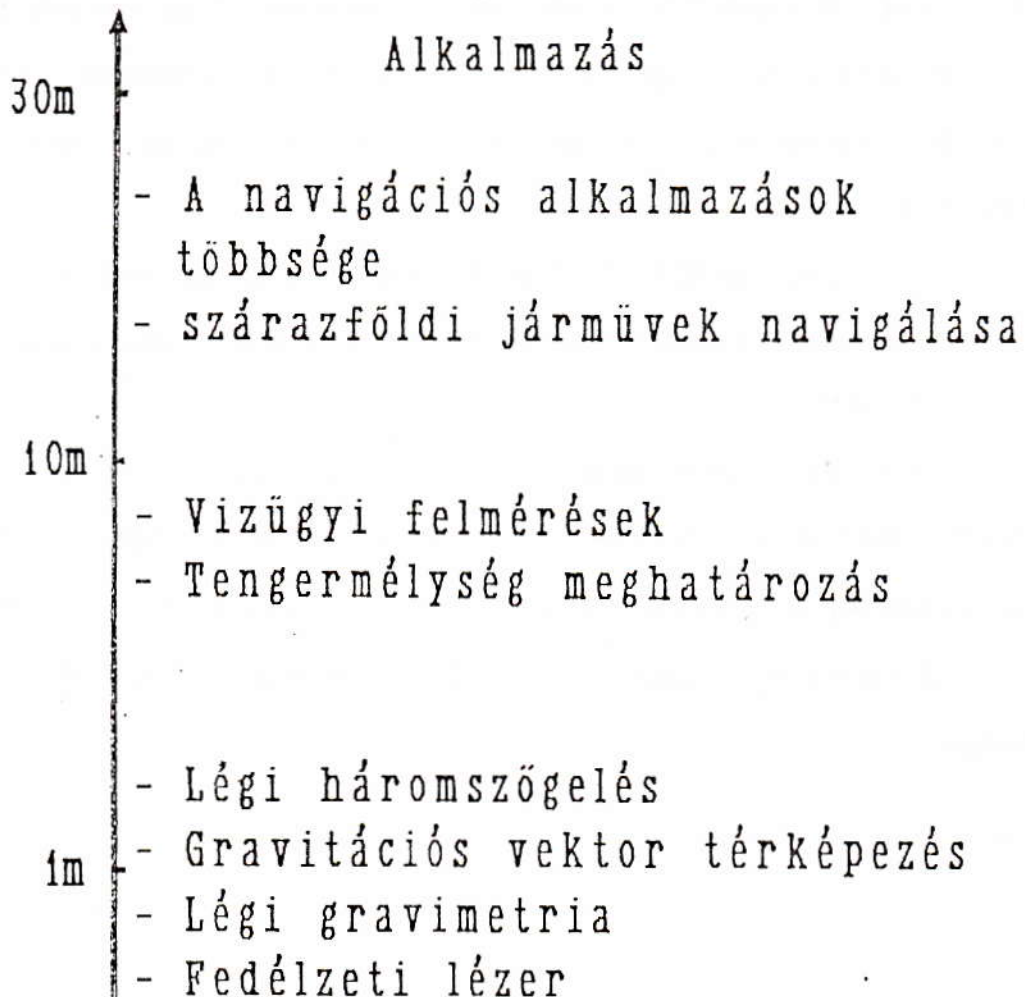
A differenciális GPS technika nagyon jól alkalmazható a durva megközelítés céljaira, feltéve, hogy a vevőberendezés NAVSTAR hordakát "lát".

Más légi alkalmazásoknál (erdő és növénykultúra permetezésénél), ahol a navigáció nem a repülési biztonsághoz kell, hanem a szállítmány elhelyezéséhez, a GPS kielégíti az igényeket.

A fenti kép kedvezőre alakul, miután a NAVSTAR GPS teljesen kiépül.

NAVIGÁCIÓS ALKALMAZÁSOK ÁTTEKINTÉSE A PONTOSSÁG SZEMPONTJÁBÓL

Pontosság



3.09 Navigációs alkalmazás áttekintése a pontosság szempontjából

A navigációs alkalmazások három nagy csoportba oszthatók:

- kispontosságú,
- közepes pontosságú és
- nagypontosságú alkalmazások.

A kispontosságú alkalmazásoknál a pontossági igény 20-30 m, a meghatározás módja pedig abszolút kinematikus és egy pontos. Ide tartoznak a hagyományos vízi és légi navigálási feladatok. Újszerűnek tekinthető a teherautók, a segélyszolgálati járművek és a taxikocsik helyének meghatározása és irányítása. E területeken a GPS akkor válik gazdaságossá, amikor a C/A kódú vevőberendezések ára néhány ezer dollárra esik.

A közepes pontosságú alkalmazásoknál a pontossági követelmény 5-10 m. Ebben a kategóriában a pszeudó-távolságmérést és a relatív helymeghatározási technikát hasznosítják. Ide tartozik a vízügyi felmérések többsége, a rakéta-fellövés navigációja és a tenger-mélységek légi távérzékeléssel történő meghatározása. Mivel ezeken a területeken valósidejű meghatározásokra van igény, a GPS technika szerves részeként szükséges kifejleszteni és bevezetni a folyamatosan alkalmazható megbízható rádiós kapcsolatot.

A nagypontosságú alkalmazásoknál a pontossági követelmény 0.5-2 m. Itt a relatív technikát használják kinematikus üzemmódban, a fázismérés, kombinált mérés vagy u.n. integrált mérés eredményeivel. Ide tartozik a földi geodéziai alapok nélküli légháromszögelés, a légi úton történő gravimetriai és gradiometriai mérések navigálása, a direkt graviméteres feladatok megoldása és a szárazföldi járművekkel végzett geoid meghatározás. Ide sorolhatók még a háromdimenziós szeizmikus mérések és a terep profil lézeres letapogatása, amelyeknél a jelenlegi helymeghatározási technika nem használható vagy kényelmetlen. Ebben a csoportban még eldöntésre vár, hogy a GPS-t kizárólagosan, vagy más pozicionáló berendezésekkel integrálva használják. A kinematikus üzemmód sikere nagyban függ a ciklus ugrások problémájának megoldásától.

KATONAI ALKALMAZÁSOK

HELYMEGHATÁROZÁS ÉS NAVIGÁCIÓ

- menet navigálás
- földközeli navigálás
- cél elfoglalás
- foto felderítés
- járművek távirányítása
- inerciális rendszerek ellenőrzése
- rakéta irányítás
- vezérlés és irányítás

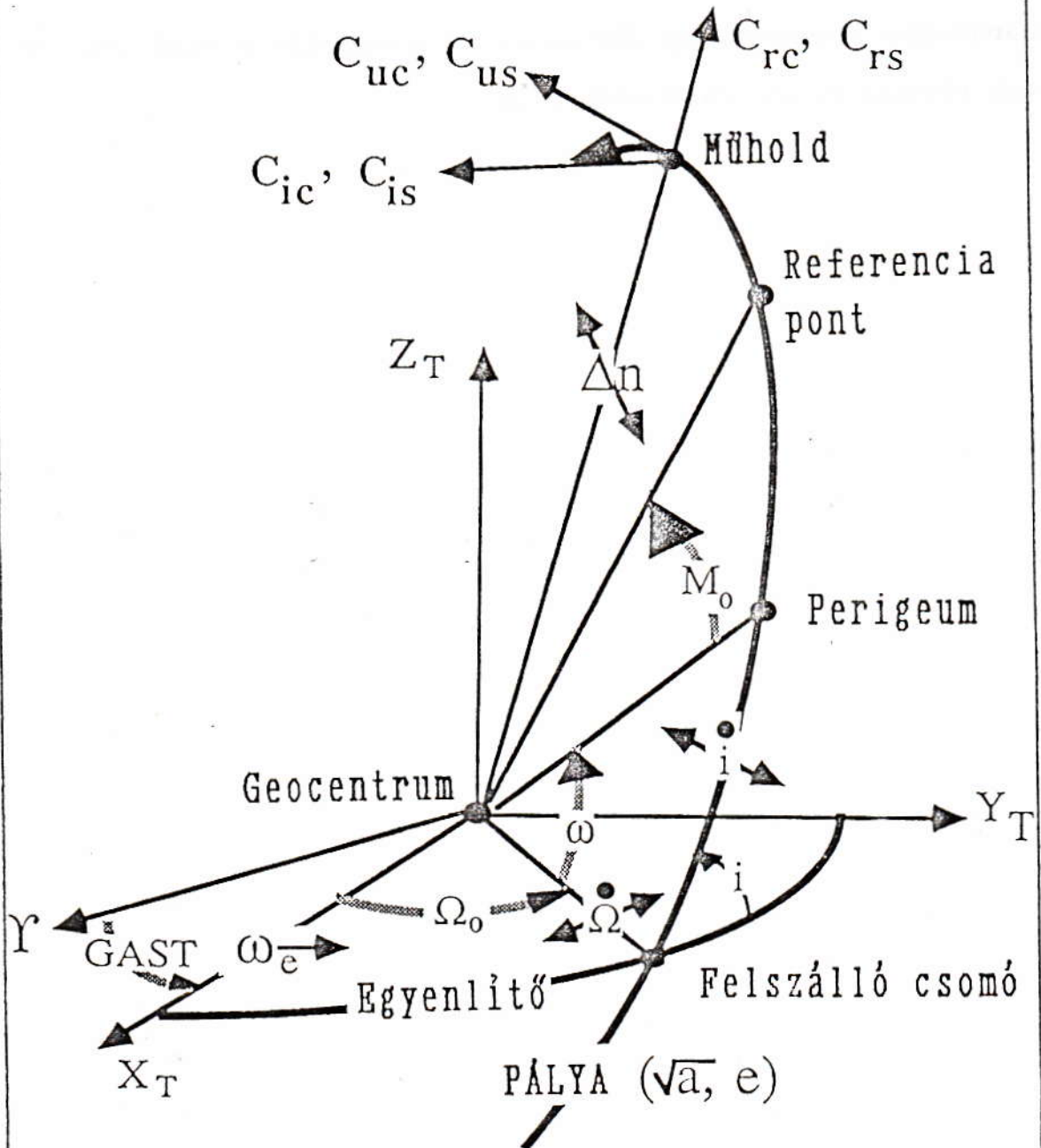
NUKLEÁRIS ROBBANTÁSOK FIGYELÉSE

3.10 Katonai alkalmazások

A Globális Helymeghatározó Műholdrendszert mindenekelőtt a valósidejű katonai célú helymeghatározás céljára tervezték. Ez magába foglalja a légi, vízi és a szárazföldi navigációt. A GPS kizárólagos szerepet fog játszani, de integrált navigációs rendszerek részeként is működtetik majd.

A PÁLYA

- 16 PÁLYAADAT, ÓRÁNKÉNT



4.00 A pálya

Az ellipszis alakú pályán négy kitüntetett pont található:

- A felszálló csomó (Ω). A pálya és az egyenlítő síkjának metszészíkján az a pont, ahol a műhold a déli féltétkéről áthalad az északra. Értékét az egyenlítő síkjában mérjük, a tavaszponttól (X_T) kiindulva.
- A perigeum argumentuma (ω). A pálya földközeli pontja. A felszálló csomótól mérjük a pálya síkjában.
- A műhold helye (u). Ez az a pont, amelyet meg kívánunk határozni. A felszálló csomótól mérve $u = \omega + v$, ahol v a valódi anomália.
- A referencia pont (M_0). Ha a műhold időben egyenletesen keringene, akkor t_0 időpillanatban ebben a pontban lenne.

A pálya paraméterek közepes földi koordinátarendszerbe (CT) való transzformálásakor három forgatást végzünk négy rendszer között:

- A műhold adott az (x''', y''', z''') rendszerben, ahol x''' mutat a műholdra, y''' a pálya síkjába fekszik és a z''' tengely merőleges a pálya síkjára.
- Ha ezt a rendszert elforgatjuk a z''' tengely körül ω szöggel, hogy a műhold a felszálló csomóba kerüljön (x''), akkor y'' marad a pályasíkban és $z'' = z'''$.
- Az (x'', y'', z'') rendszert ezután az x'' tengely körül a pálya síkjából az egyenlítő síkjába forgatjuk az inklináció értékével. Ekkor $x' = x''$, y' az egyenlítő síkjába fekszik és z' a Föld forgástengelye.
- Végül az x', y', z' rendszert a z' tengely körül úgy forgatjuk el, hogy az x tengely a greenwichi meridián irányába mutasson. A műhold ekkor a CT (x, y, z) koordinátarendszerbe került. Ez az a rendszer (közepes földi koordinátarendszer) amelyben a műholdak koordinátáit számítjuk és a helymeghatározást végezzük. Használatos még a CTS jelölés is (Conventional Terrestrial System).

FEDÉLZETI PÁLYAADATOK

M_0	Középanomália
Δn	A közepes mozgás korrekciója
e	Excentricitás
\sqrt{a}	A fél nagytengely négyzetgyöke
Ω_0	A felszálló csomó hossza
i_0	Inklináció
ω	A perigeum argumentuma
$\dot{\Omega}$	A felszálló csomó változása
\dot{i}	Az inklináció változása
C_{uc}, C_{us}	Pályamenti korrekciók
C_{rc}, C_{rs}	Radiális irányú korrekciók
C_{ic}, C_{is}	Pályasíkra merőleges korrekciók
t_{oe}	A pályaelemek epochája

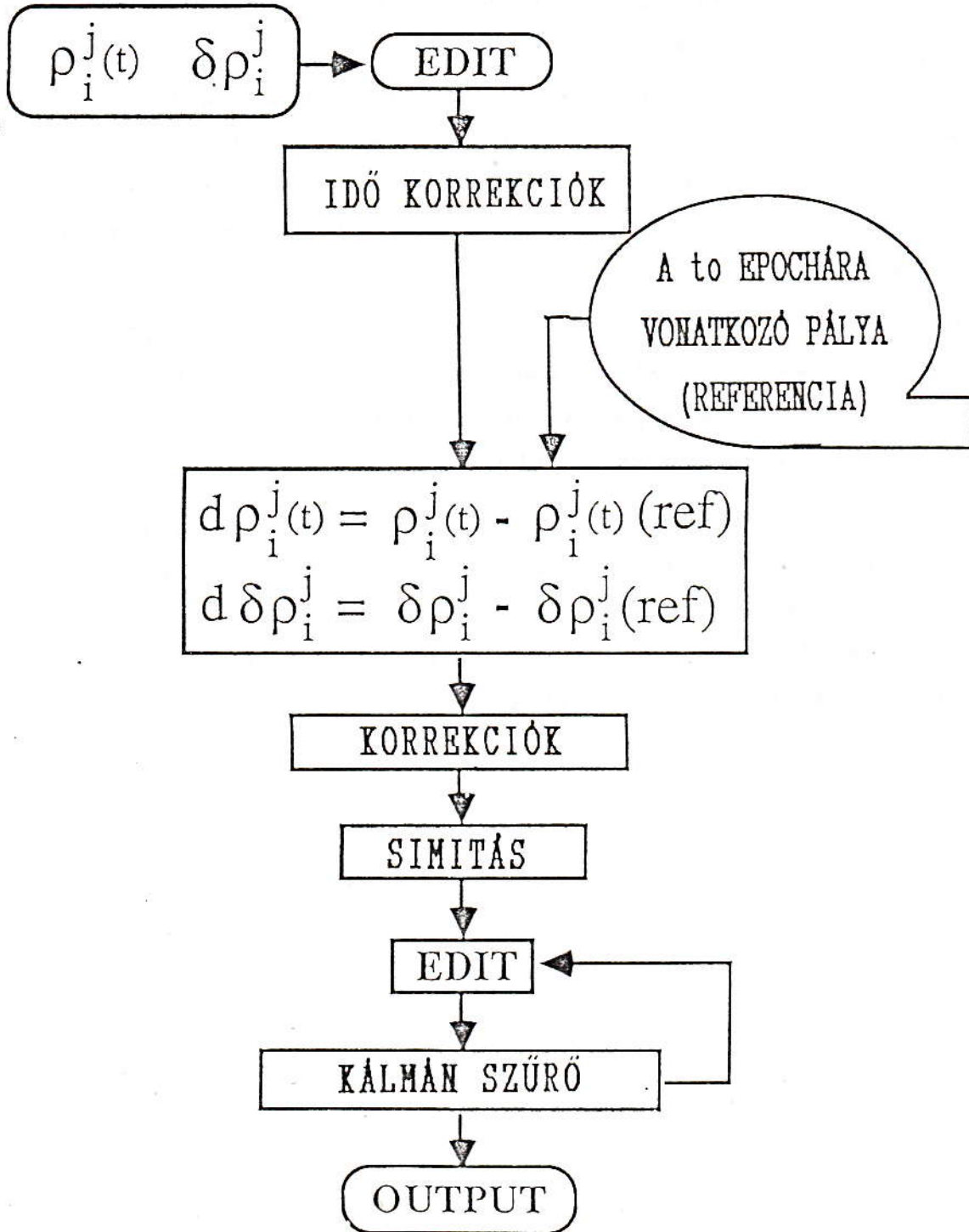
4.01 A fedélzeti pályaadatok

A fedélzeti pályaadatokat a GPS holdak folyamatosan sugározzák (broadcast efemeris). Ezek az adatok két részből állnak: Az első adatcsoport megadja a Kepler pályát ($\sqrt{a}, e, i_0, \omega, M_0$) t_0 időpontban. A második adatcsoport lényegében a tényleges pálya és a Kepler ellipszis pálya közötti eltéréseket tartalmazza ($\Delta n, \dot{\Omega}, \dot{i}$ és a hat cosinus és sinus együtthatók). Ezek az eltérések tartalmazzák a gravitációs és a nem gravitációs eredetű perturbációs hatásokat.

A broadcast efemerisz extrapolált pálya. Az extrapolálást Kálmán szűrővel, az öt követő állomás egyhetes észleléseire támaszkodva végzik. A fedélzeti pályaadatok a referencia ponttól (a pályaelemek epochája) 1-1.5 órás pályáivra érvényesek.

A fedélzeti pályaelemek pontossága 20-100 m, jelentősége ezért elsősorban a navigációs célú feladatoknál van. Rövidebb, (<50 km) bázisvonalak esetén geodéziai célra is megfelel a fázismérési technika alkalmazásával, de nagyobb bázisvonalak meghatározásához utólag számított, pontosabb pályaadatok szükségesek.

PÁLYA ELŐREJELZÉS



4.02 Pálya előrejelzés

A fedélzeti pályaadatokat a fő követő állomáson számítják és ellenőrzik. A számítást két lépésben végzik:

- a. "off-line" módon a korábbi (egy hetes intervallum) efemeridákra a legkisebb négyzetek módszerével simítást végeznek, majd
- b. "on-line" technikával, Kálmán szűrő és az észlelések felhasználásával számítják a pontos pályát; az előrejelzett pályához ennek a pályának az extrapolálásával jutnak.

Az "on-line" számításhoz a pseudo-távolság mérést és a doppleres technikát (ó s-os integrálással) használják.

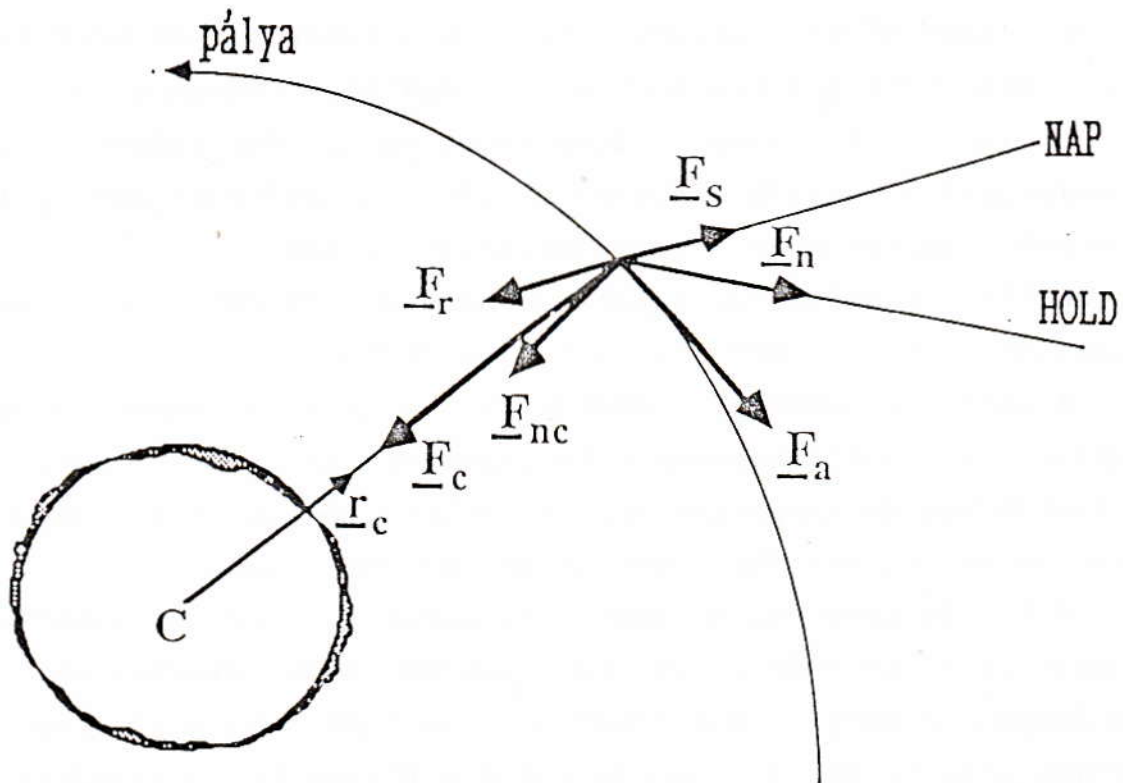
A mérési eredményeket összevetik az első lépésben számított pályával majd a különbségeket korrigálják az ismert hatásokkal: ionoszférikus és troposzférikus refrakció, relativisztikus hatás, valamint az antenna fáziscentrumának külpontossága.

A távolságmérések sorozatát 15 percenként egy simítógörbével kiegyenlítik, és számítanak egy reprezentáns állomás-szatellita távolságot. A Doppler méréseket nem simítják, hanem 15 percenként vesznek mintát. Ezekből az adatokból a Kálmán-féle szűrővel számítják a műhold helyzet és sebesség vektorát. A számítási folyamat outputja a ó pályaelem perturbációja, a műhold órájának állása és járása, 3 db a holdra ható sugárnyomás paraméter, az állomás óráinak paraméterei, az aktuális troposzférikus paraméter, valamint három földforgás paraméter.

Az első lépésben számított durva pályát korrigálják a perturbációkkal, és az óra paraméterekkel együtt feljuttatják a holdakra. Az előrejelzett pálya hibája pályairányban 7m, keresztirányban 3m és radiális irányban 1m. (Megjegyezzük hogy egyes szerzők ezeket az adatokat túlzottan optimistának tartják.)

A pályaelemeket nepona legalább egyszer felfrissítik.

A MŰHOLDRA HATÓ ERŐK



A NAVSTAR holdakra
ható jelentősebb
erőhatások

• \underline{F}_c A Föld gravitációs hatásának
gömbszimmetrikus része

• \underline{F}_{nc} A nem gömbszimmetrikus
gravitációs hatás

• $\underline{F}_n, \underline{F}_s$ A Hold és a Nap hatása

• \underline{F}_r A Nap sugárnyomása

• \underline{F}_a A légkör fékező hatása

Egyéb hatások

Árapályhatások

Máneses hatások

4.03 A műholdra ható erők

A GPS technikával végzett helymeghatározás pontosságát erősen befolyásolja a pálya ismeretének megbízhatósága. A pálya pontossága viszont a műholdra ható erők ismeretének a függvénye.

A műhold mozgását befolyásoló erők:

- a) a Föld gravitációs hatása
- b) a Hold, Nap és a bolygók gravitációs hatásai
- c) az atmoszféra fékező hatása
- c) a Nap közvetlen és közvetett sugárnyomása
- e) mágneses erők és
- f) a Föld gravitációs terének változása, árapályhatások.

A fentiek közül a legjelentősebb a Föld gravitációs hatása, amelyet két részre bonthatunk:

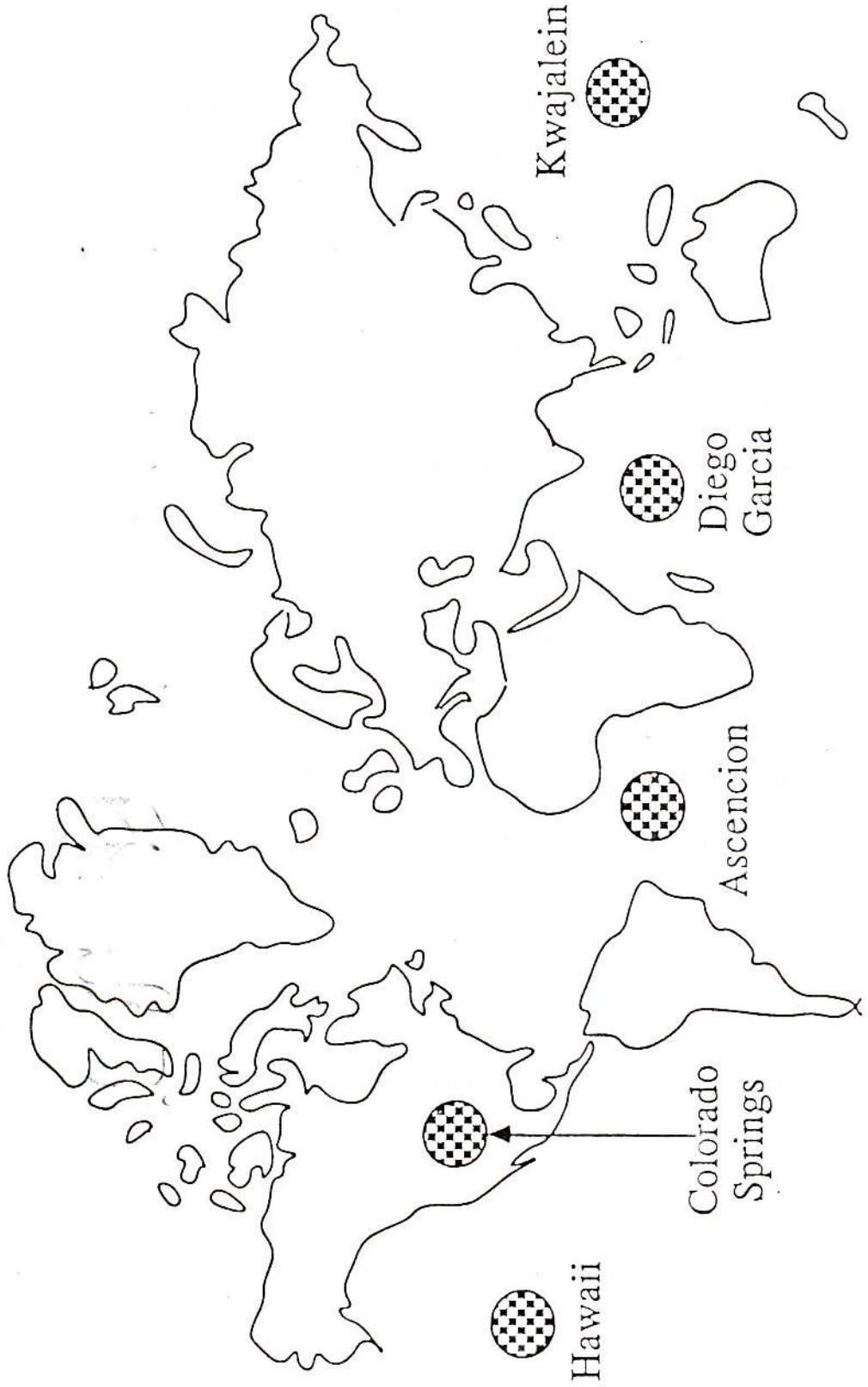
a) a fő, más szóval centrális rész, amely radiális irányban hat és

b) a Föld nem gömbszimmetrikus tömegeloszlásából származó rész.

Ez utóbbi, három nagyságrenddel kisebb mint a centrális rész, és gravitációs eredetű perturbációnak nevezzük.

A FÖLDI KÖVETŐ (ÜZEMELTETŐ) HÁLÓZAT

4.04

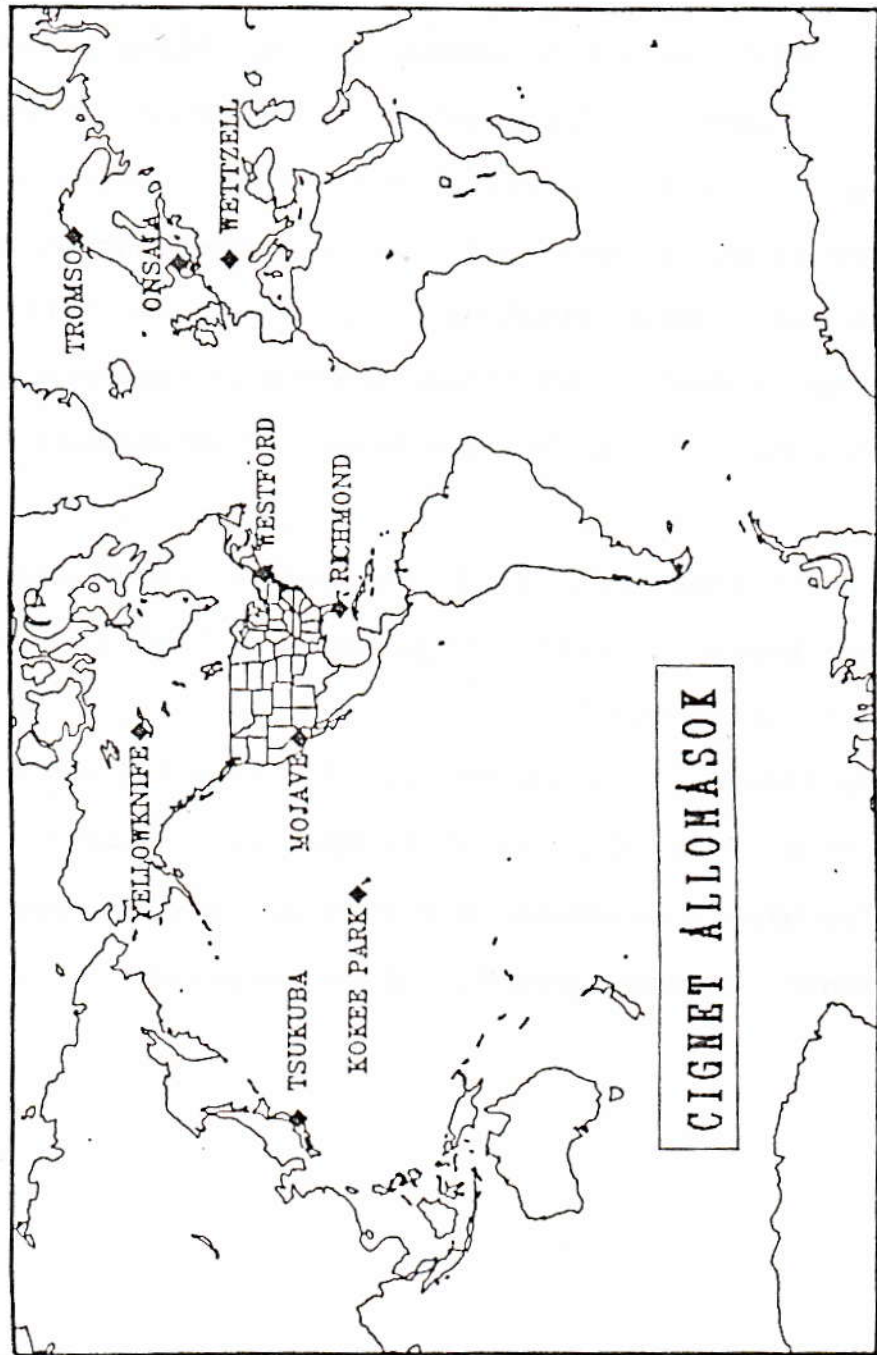


4.04 A földi követő (üzemeltető) hálózat

A GPS holdak üzemszerű működését öt állomás összehangolt munkájával végzik. Az állomásoknak három feladatuk van:

- Mind az öt állomás észleli valamennyi holdat és ellenőrzi az előrejelzett pályát. A követést kétfrekvenciás vevőkkel és cézium oszcillátor alkalmazásával végzik. A troposzférikus késés értékének pontos számításához rendszeresen mérik a meteorológiai adatokat. Ennek az öt állomásnak a koordinátái pontosan ismertek.
- Három telemetriai állomás (Ascension, Diego Garcia, and Kwajalein) képes adatokat feljuttatni a holdra (pályaadatokat és órákorrekciókat).
- A fő állomás Colorado Springs, ahová a többi követő állomás megküldi az észlelési adatokat. Ezekből az adatokból számítják az előrejelzett pályákat, valamint az órákorrekciókat. A fő állomás feladata a meghibásodott holdak lecserélése is.

PÁLYASZÁMITÁS UTÓFELDOLGOZÁSSAL



CIGNET ÁLLOMÁSOK

4.05 Pályaszámítás utófeldolgozással

Az előrejelzett fedélzeti pályát nem igényli minden felhasználó. A geodéziai célra nagyobb bázisvonalak esetén nem elegendő az előrejelzett pálya pontossága sem. Bizonyos alkalmazási területeken ezért utólag meghatározott, pontosabb pályával dolgoznak. Ezek az megoldások alternatívái a fedélzeti pályaadatoknak.

Több utófeldolgozásra specializálódott szervezet működik:

- Egyik közülük a Cooperative International GPS Network (CIGNET) hálózat. Ez a hálózat is szolgálatyszerűen végzi a pálya utólagos meghatározását de kizárólag polgári céllal és a holdakkal csak vételi kapcsolatban van. A CIGNET állomásai: TSUKUBA (Japán), KOKEE PARK, YELLOW KNIFE (Kanada), MOJAVE, WESTFORD, RICHMOND (USA), TROMSO (Norvégia), ONSALA (Svédország) és WETTZEL (NSzK).
- Az USA Nemzeti Geodéziai Szolgálat (NGS) ugyancsak végez rendszeres pályameghatározást, ill. azok üzletszerű eladását polgári felhasználók számára. A jelenlegi ár; 2000 USD egy félévre és 100 USD egy hétre.
- Az un. "preciz efemerisz" szolgálatát végzi az amerikai Naval Surface Weapons Center (NSWC).
- Létezik már Nyugat-Európai hálózat is TROMSO (Norvégia), SANDNES (Svédország), METSAHOVI (Finnország), WETTZEL (NSzK), MADRID, SAN FERNANDO (Spanyolország) és DIONYSOS (Görögország) állomásokkal.

További követő hálózatok kiépítése várható.

A JELSTRUKTÚRA

ALAP FREKVENCIA

- $f_0 = 10.23 \text{ MHz}$

VIVŐFREKVENCIA

- $L1 = 154 f_0 = 1575.42 \text{ MHz}$

- $L2 = 120 f_0 = 1227.60 \text{ MHz}$

C/A KÓD

- 1 ms hosszú, $f_0/10$ jelgyakorisággal (1 MHz)

P KÓD

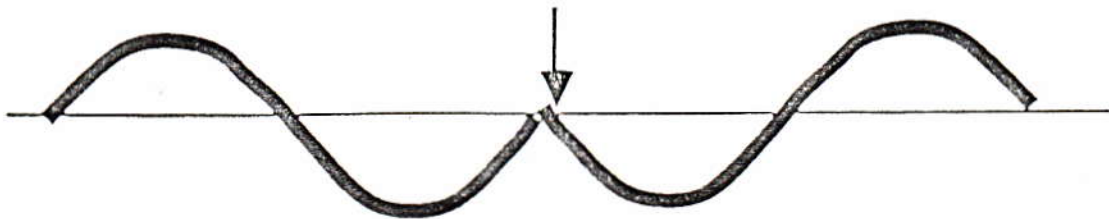
- 267 nap hosszú, f_0 jelgyakor. al (10 MHz)

ÜZENET

- 1500 bit, átviteli sebesség 50 bps

A FÁZIS MODULÁCIÓ TECHNIKÁJA

180 fokos fázisváltás



5.00 A jelstruktúra

A GPS technika alapja a pontos időmérés. Ennek megfelelően a műholdakon nagy stabilitású oszcillátorokat helyeznek el. Jelenleg az alábbi oszcillátorok ismeretesek:

Tipus	$\Delta f/f$
Rubidium	10^{-11} – 10^{-12}
Cézium	10^{-12} – 10^{-13}
Hidrogén maser	10^{-14} – 10^{-15}

A GPS oszcillátorok alapfrekvenciája $f_0 = 10.23$ MHz, amelyből képezik a két vivőfrekvenciát ($L1 = 1575.42$ MHz, $L2 = 1227.60$ MHz), valamint a C/A és P kódok frekvenciáit.

A C/A kód ál-véletlen jeleinek előfordulási gyakorisága 1.023 MHz, a jelsorozat ismétlődésének az ideje pedig 1 msec. A kódolás algoritmusa hozzáférhető.

A P kód ugyancsak ál-véletlen jelekből áll, a jelek gyakorisága 10.23 MHz a jelsorozat ismétlődése pedig 267 nap. A kódok titkosak. Az $L1$ vivőhullám a C/A és a P kódokkal, az $L2$ viszont csak a P kóddal van modulálva.

A jelek modulálása egyszerű módon történik. A kód értéke -1 vagy $+1$. Ha a jel fázisa 180 fokot változik (a mutatott módon), akkor a kód értéke is felcserélődik.

A fentiekén kívül a műhold sugározza még a szatellita üzenetet és információt a GPS holdak állapotáról, 50 baud adattovábbítási sebességgel.

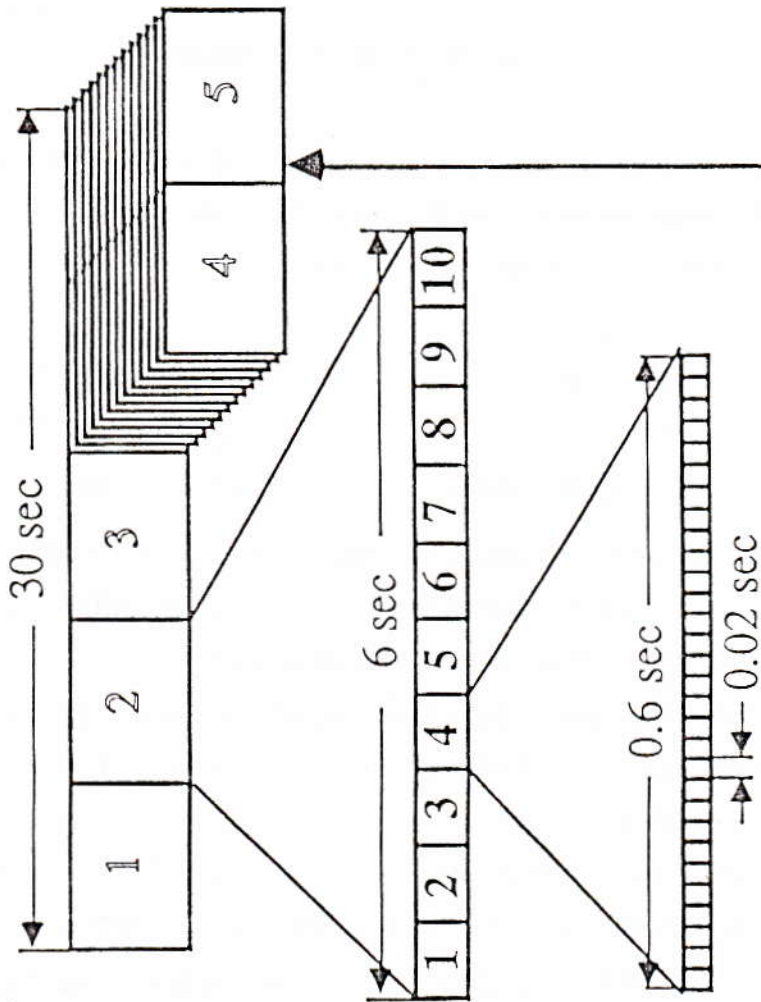
AZ ÜZENET FORMÁTUMA

Az alapüzenet hossza 1500 bit

1 egység = 5 alegység

1 alegység = 10 szó

1 szó = 30 bit



Egy ~~FŐEGYSÉG~~ ^{lap} mind a 25 lapját tartalmazza a 4.-5. alegységnek = 37 500 bit, átviteli idő 12.5 min

A 4. és 5. alegység 25 lapot tartalmaz

5.01 Az üzenet formátuma

A GPS üzenet egy egysége 1500 bit-et tartalmaz. Az átviteli sebesség 50 bps, ami azt jelenti, hogy a teljes üzenet átviteléhez 30 s-ra van szükség.

Minden egység 5 alegységet és minden alegység 10 db egyenként 30 bit-ből álló szót foglal magába.

Az 1-3 alegységek tartalma általában nem változik egy főegységben. A 4. és 5. alegységek információi viszont megváltoznak egy ségről egységre. Egy főegység 25 egységből áll, minden információt tartalmaz és az átviteléhez 12.5 perc szükséges.

Egy bit átvitele tehát 20 msec-ot igényel. Ez idő alatt a C/A kód (1023 chip) pontosan 20-szor ismétlődik.

Egy bit átviteli ideje alatt:

- 20 460 C/A kód chip
- 204 600 P kód chip és
- 31 508 400 ciklus történik L1 frekvencián

AZ ÜZENET TARTALMA

1. ALEGYSÉG

- Opciók (kódok, műholdak pontossága és állapota)
- Az adatok kora
- A műhold órákorrekcióinak koefficiensei

2. ÉS 3. ALEGYSÉG

- Pálya paraméterek

4. ALEGYSÉG

- A 25-32 holdak almanachja (2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10. lapok)
- Ionoszférikus modell és az UTC adatok (18. lap)
- A 32 db műhold konfigurációja (25. lap)
- A 25-32 holdak állapota (25. lap)
- Foglalt lapok (1, 6, 11, 12, 16, 19-24)
- Tartalék lapok (13, 14, 15)
- Speciális üzenetek

5. ALEGYSÉG

- Az 1-24 holdak almanachja
- Az 1-24 holdak állapota (25. lap)

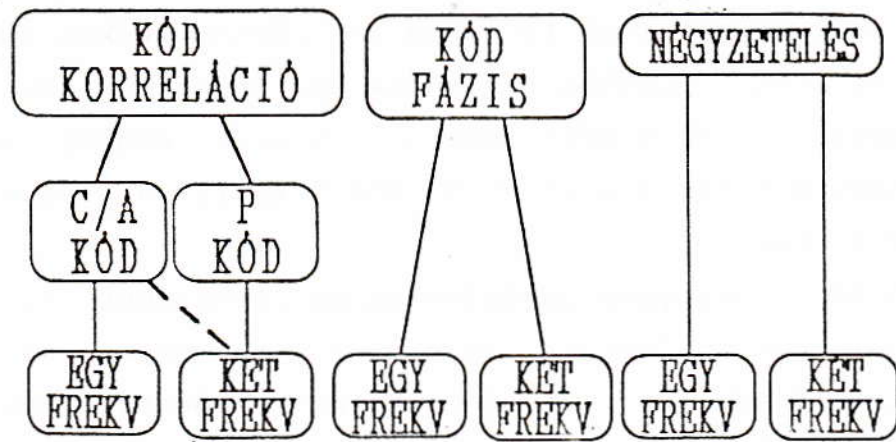
5.02 Az üzenet tartalma

A fedélzeti pályaadatok eléréséhez mind az öt alegység jelentős szerepet játszik.

- Az 1. alegység tartalmazza az órákorrekciók koefficienseit, a változók opcióit, és az adatok korát.
- A 2. és 3. alegységben találjuk a pályaadatokat.
- A 4. alegységnek csak 10 lapja tartalmaz értékes információt. Ezek az adatok magukba foglalják az ionoszférikus modellt, az UTC adatait, holdanként opciót, milyen kódról van szó. Itt található továbbá a 24 db holdon felüli, un. tartalék holdak információi.
- Végül az 5. alegység tartalmazza az almanachot, valamint a 24 db hold állapot jellemzőit. Az almanach valamennyi hold durva pályadatait (Kepler pálya és a fő perturbációk) tartalmazza.

Minden alegység (6 sec) két szóval kezdődik: A TLM (telemetrikus szó), a fedélzeti adatok felfrissítésével változik. A HOW (hand over) szó pedig tartalmazza a Z számot, amely a műhold órájának az állását mutatója 1.5 s-os egységekben. Mivel az órákat hetente indítják újra, a Z szám maximális értéke 403200 lehet. A Z szám a P kód azonosításához szükséges.

GPS VEVŐ TÍPUSOK



Trimble
4000A
4000S

TI-4100

ISTAC
Model 2002

Macrometer
V-1000 II

Magnavox
T-Set
WM-101

EDO
SatTrak

Norstar
1000

6.00 GPS vevőtípusok

A GPS vevőket aszerint osztályozhatjuk, hogy milyen típusú követő csatornáik vannak (kód-korrelációs, négyzeteléses, vagy kód-fázis) és hogy csak az L1 jelet használja-e, vagy az L1 és L2 jelet együttesen. Ezenkívül a kód-korrelációs vevőket tovább osztályozhatjuk aszerint, hogy használják, vagy nem használják a P-kódot. A következőkben ezek alapján osztályoztunk néhány GPS vevőt, amelyek már kereskedelmi forgalomban vannak.

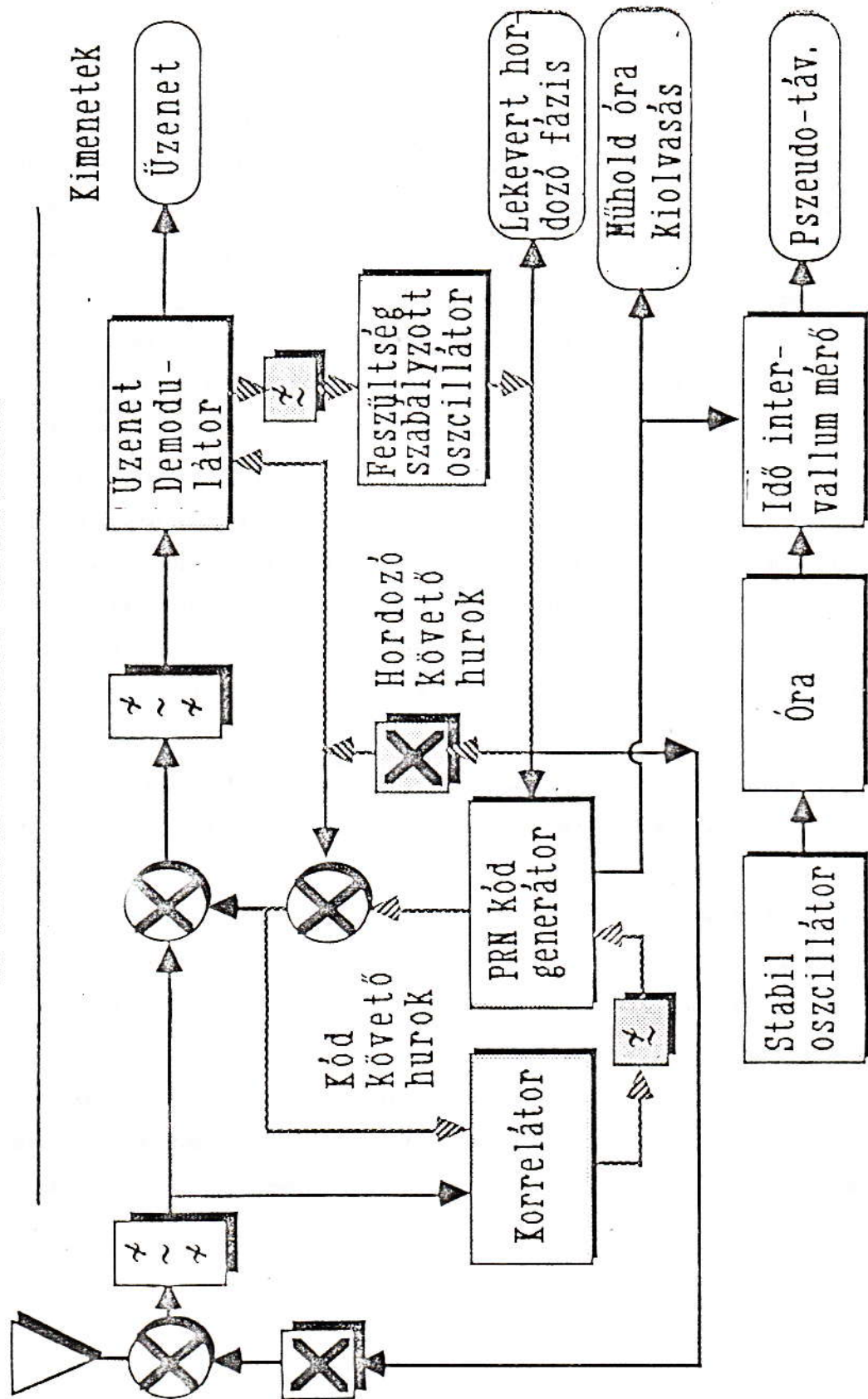
A legtöbb polgári célra készült GPS vevő egyfrekvenciás C/A kód-korrelációs vevő. A jelenleg rendelkezésre álló kód-korrelációs vevők közül egyik legismertebb a TI-4100, amely két frekvencián működik. Ez a vevőtípus a P kódot is használja. Ha a P kód nem áll rendelkezésre, a TI-4100 a C/A kóddal is működtethető. Egyes gyártó cégek azt tervezik, hogy C/A kódot használó vevőikhez a második frekvencia vételét is biztosítják L2 négyzetelős csatornák hozzáadásával. A piacon lévő kód-fázisos vevők közül a ISTAC-SERIES GPS Positioner Model 2002-t említjük. Ez csak az L1 frekvencián működik, habár a tervek szerint kétfrekvenciás modellt is gyártani fognak.

A makrométerből egy és többfrekvenciás verziók állnak rendelkezésre, négyzeteléses csatornákkal. Az elsőnek kifejlesztett egy-csatornás változat a Macrometer V-1000; a kétfrekvenciás modell a Macrometer II, és a Mini Mac.

A vevőtípus kiválasztásánál az alkalmazási szempontokat kell figyelembe fenni. A kiválasztási eljárás során mérlegeljük a fizikai környezetet, a pontossági és megbízhatósági követelményeket, stb.

A KORRELÁCIÓS CSATORNA

6.01



6.01 A korrelációs csatorna

Az eddig kifejlesztett legtöbb vevőtípus a kódkorrelációs vevők osztályába sorolható és ezek egy, vagy több korrelációs csatornával rendelkeznek. Ez az egyetlen típus, amely képes a szatellita üzenet dekódolására. A túlololdali blokk diagramm szemlélteti a koncepciót, de a csatorna részletes konstrukciója vevőről vevőre változik. A vevő mikroprocesszorával való kapcsolatot nem tüntettük fel.

A korrelációs vevő két fő blokkból áll: a kód követő hurokból és a hordozó követő hurokból. A kód követő huroknak feladata, hogy pszeudó távolság mérési adatot szolgáltatson a P, vagy a C/A kódból és ugyanakkor a vett jelet úgy alakítsa, hogy az üzenetet dekódolni lehessen. A hurokban egy kód generátor előállítja a szatellita jelén alkalmazott kódot. A kód kezdete késleltetve van a vevő és a szatellita távolságának függvényében. A pontos késést a vett jel és a vevő által generált kód keresztkorrelációjával állapíthatjuk meg. Ha a két kód nem esik egybe, akkor egy korrekációs jel kerül a vevő órájához, amely a kódgenerátort vezényli. Ez a korrekáció addig folytatódik, amíg a két kód időben egybe esik. Amikor ez megtörtént, akkor mondjuk, hogy a vevő rákapcsolódott a szatellita jelére (lockolt). Amikor a követő hurok rákapcsolódott a jelre, a késleltetett kód órajele lényegében megegyezik a szatellita órájának jelével. A kód órajel és a vevő órajel különbsége a pszeudo távolságnak felel meg. A vevő órája természetesen GPS rendszerben kell járjon. Amint a követő hurok rákapcsolódott a jelre a PRN kódot egyszerűen leválaszthatjuk a szatellita jelről úgy, hogy a helyileg generált kóddal keverjük és szűrjük.

Az így visszaállított jelet ezután a hordozó követő hurokba vezetjük, amely demodulálja a szatellita üzenetet oly módon, hogy a csatorna helyi oszcillátor fázisát a középfrekvenciával, vagy beat frekvenciával hozza azonos fázisba. Amikor az oszcillátor rákapcsolódott a szatellita jelére, a szatellita távolság változásának megfelelően követi annak fázisát. A hordozó beat fázis észlelési mennyiséget úgy kapjuk, hogy egyszerűen leszámoljuk a ciklusokat és megmérjük a maradék fázis értéket a rákapcsolt lokál oszcillátor jelén. Egyesek a négyzeteléses módszert részesítik előnyben. Minden hordozó követő hurok 180 fokos fázis többértelműséggel rendelkezik, amelyet az üzenet struktúra segítségével küszöbölhetünk ki.

FREKVENCIA ETALONOK ÉS ÓRÁK

KVARC KRISTÁLY

- elektromos mezőben rezgő kristály által keltett frekvencia (piezoelektromos hatás)
- olcsó, kis méretű és robusztus

RUBIDIUM-GŐZ CELLA

- a rubidium 87 atomok hiperfinom energia átmenetének rezonancia frekvenciáján 6.834 682 602 GHz-en oszcillál
- az atomórák közül a legolcsóbb - kb 5000 \$

CÉZIUM NYALÁB CSŐ

- a cézium 133 atomok hiperfinom energiaátmenetének 9.192 631 770 GHz-es rezonanciáján rezeg
- ezt a rezonancia frekvenciát használják az SI (atomi) másodperc definíciójára
- az atomórák közül hosszútávon a legpontosabb

HIDROGÉN MÉZER

- az atomos hidrogén hiperfinom energiaátmenete 1.420 405 757 68 GHz rezonanciáján rezeg
- az atomórák közül a legnagyobb stabilitású

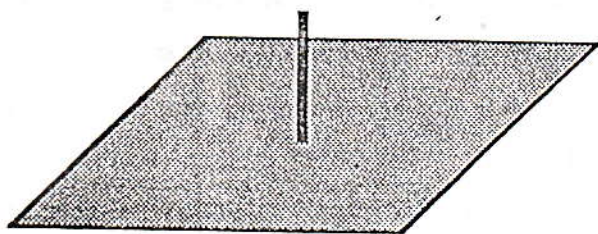
6.02 Frekvencia etalonok és órák

A GPS nagypontosságú helymeghatározási képessége részben a szatellitán alkalmazott nagypontosságú atomi oszcillátorokon alapszik, amelyek vezérlik a hordozó frekvenciák és a kódok előállítását. Ezeket a nagypontosságú oszcillátorokat gyakran frekvencia etalonoknak nevezzük. A GPS vevőkben is szükség van nagypontosságú oszcillátorokra. Az oszcillátor frekvenciát a szükségletnek megfelelően felszorozzák, vagy leosztják, hogy a megfelelő lokáloszcillátor frekvenciákat előállítsák, továbbá, hogy az órát meghajtsák.

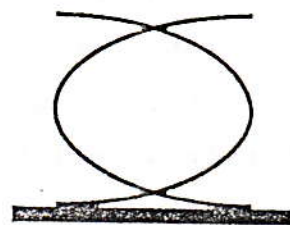
Kereskedelmi forgalomban négy nagypontosságú oszcillátor típus áll rendelkezésre. A leggyakoribb a termosztáttal ellátott kvarckristály. A rezgés forrása egy kvarclemezt, amelyet elektromos térrel gerjesztenek. A másik három típus atomi oszcillátor: a rubídium-gőz cella, a cézium-nyaláb cső és a hidrogén-maser. Működésük az alkalmazott atomok energia szintje közötti elektron átmeneteken alapszik. Ez az átmenet mikrohullámú jelet gerjeszt, melynek stabilitása nagy és frekvenciája igen jól meghatározott. Ezt a jelet használják egy visszacsatolásos mechanizmus segítségével egy kvarc oszcillátor frekvenciájának vezérlésére.

A Block II GPS szatelliták négy atomi frekvencia etalont tartalmaznak, két rubídiumot és két céziumot. A földi állomás parancsára bármelyik kiválasztható a szatellita fő oszcillátorává.

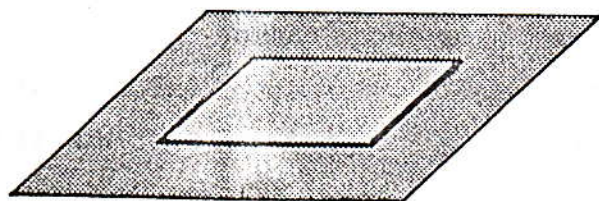
GPS ANTENNAT I PUSOK



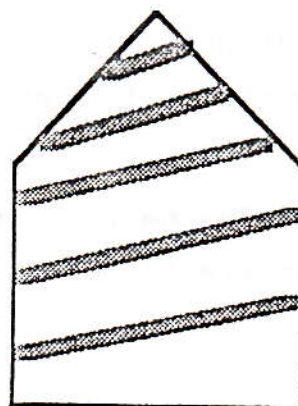
Monopólus



Quadrifilar helix



Mikrosztrip



Spirális helix

6.03 GPS Antennatípusok

A GPS rendszerekhez többféle antennatípus áll rendelkezésre. Ezeket általában a következőképpen csoportosíthatjuk:

- a) monopólus vagy dipólus konfigurációk
- b) quadrifilar helixek
- c) mikrosztrip
- d) spirális helixek.

Minden GPS antenna körkörösén polarizált, Legtöbb esetben a vevő előerősítőt beépítik az antennába, mint az antenna bázislemez integrált részét. Ezzel zajcsökkentést és a jelveszteségek csökkentését igyekeznek elérni.

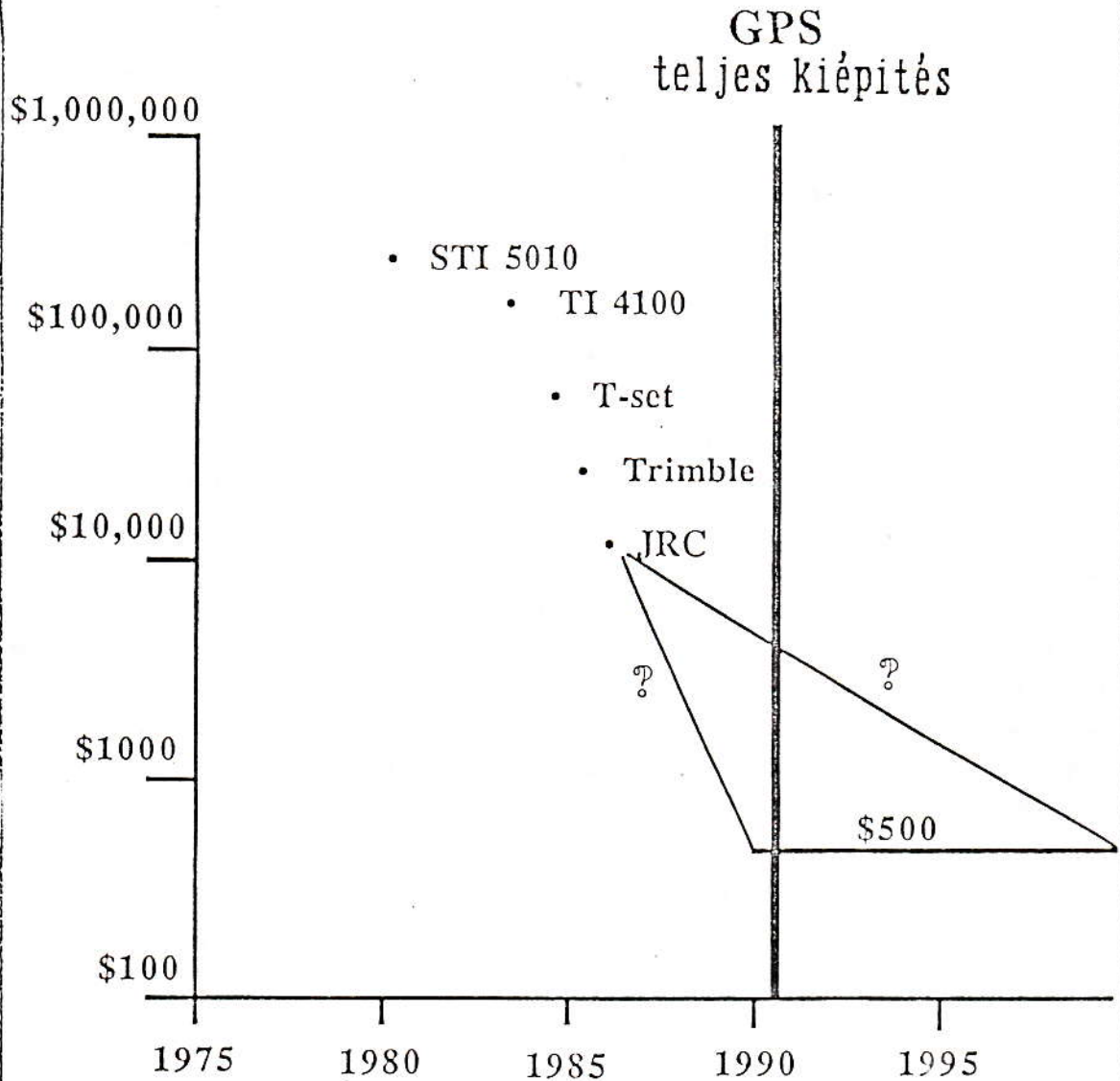
A monopólus, illetve dipólus konfigurációk megfelelő működésekhez általában egy alapsík szükséges. Ezek egyfrekvenciás antennák. Előnyük a kis méret és a konstrukciós egyszerűség. Az alaplemez méretének helyes megválasztásával csökkenthető a több utas terjedés és a zavaró interferencia.

A quadrifilar antennák szintén egyfrekvenciás eszközök, azonban bonyolultabb konstrukciójuk, mint a dipólusuk. Meglehetősen nehéz a megfelelő fázis és polarizációs viszonyok beszabályozása a gyártás időpontjában és azimutálisan sem szimmetrikusak. Előnyük azonban, hogy nagy a nyereségük és az iránytól független érzékenységük. Nem szükséges alaplemezzel rendelkezniük, de néha ezt mégis alkalmazzák a hátsó sugárzási nyalábok csökkentésére. Egyes típusoknál kisméretű, elektromos szempontból veszteséges anyagokat használnak az alaplemezhez, hogy a hátsó nyalábok hatását csökkentsék.

A mikrosztrip antennák a legegyszerűbb és legrobosztusabb konstrukciók. Egy és két frekvenciás vételre is alkalmasak, igen kis kiálló profillal és ezáltal ideálisak a légi közlekedésben. Legfőbb hátrányuk a viszonylag kis antennanyereség, habár ez ellensúlyozható kis zajú előerősítővel.

A spirális helixek az L1 és L2 kétfrekvenciás működés előnyeivel rendelkeznek. Antennanyereségük és irányfüggőségük jó, habár magas profiljuk kissé hátrányos a fázisjellemzőkre. A quadrifilar antennákhoz hasonlóan ezek is mutatnak bizonyos azimutális asszimmetriát, amelyet gondos földi beállítással ellensúlyozhatunk.

GPS VEVÖ ÁRAK



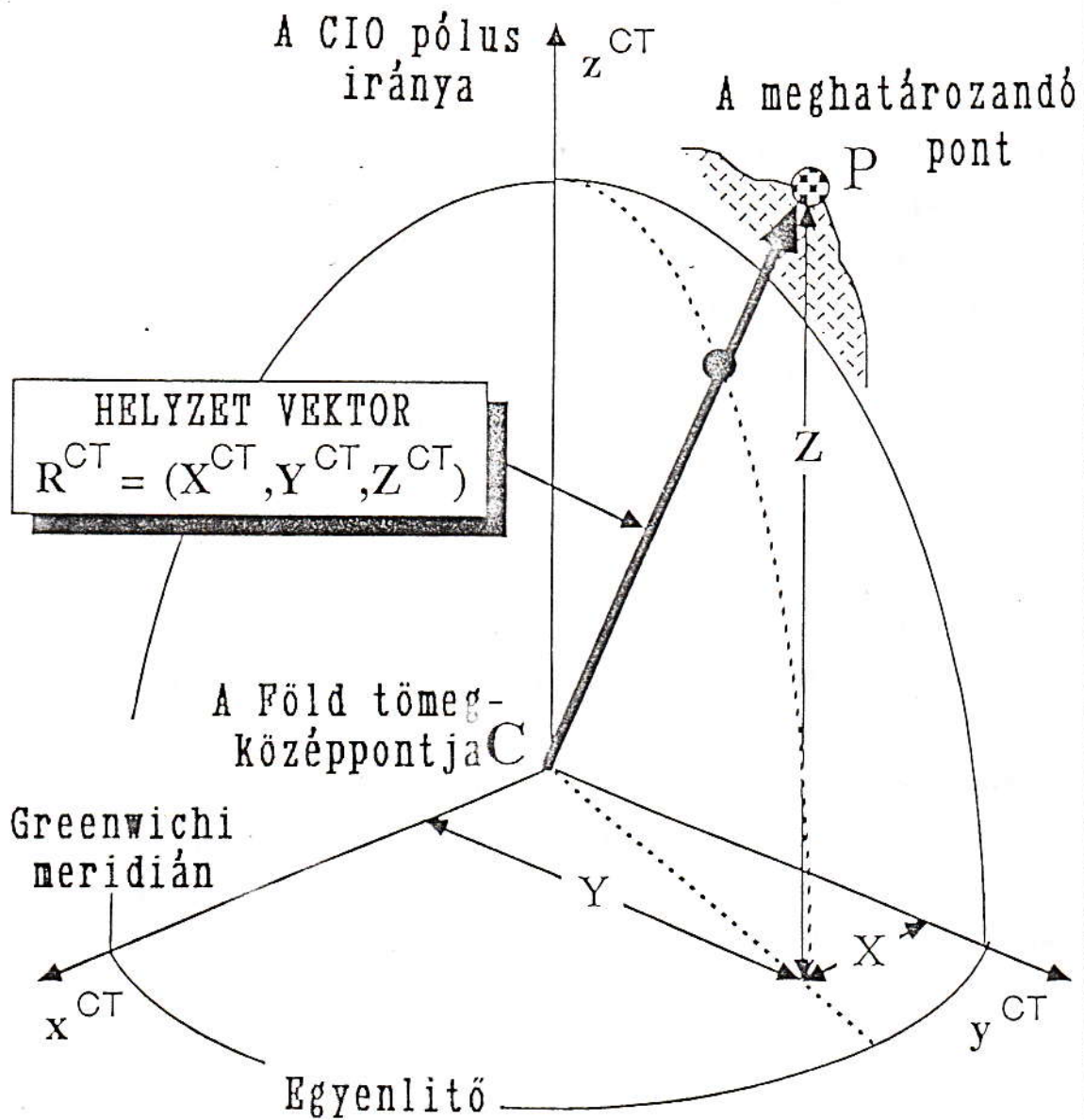
6.04 GPS vevő árak

Mindenkit, aki a GPS technikát alkalmazni akarja, természetesen érdekel a vevők ára. Mint minden csúcstechnológiájú termék esetében a GPS vevők árában is tükröződnek a fejlesztés költségei, a piaci verseny és a kereslet. Az első kereskedelmi forgalomba került vevő a Stanford Telecommunications STI 5010 több százezer dollárba került. Csak néhányat gyártottak belőle. Az elmúlt 9 évben 1980-tól sok különböző cég jelent meg a GPS vevőkkel. A jelenleg rendelkezésünkre álló vevőtípusok száma meghaladja az 50-et és számos új van fejlesztés alatt.

Ez a nagymértékű piaci verseny a vevőkészülék árak jelentős csökkenéséhez vezetett. Közülük számos 30 000 \$, vagy ez alatt kapható. Az árcsökkenési tendencia tovább folytatódik. Különös hatással lesz erre a GPS rendszer teljes kiépítése 1992-re.

Természetesen nem lehet a végső árszintet megjósolni, 1985 augusztusában például egy amerikai gyártó cég négyezer dollárért kínált vevőt 1000-nél több megrendelés esetén. (Merrifield). Mint a legtöbb csúcstechnológiájú terméknel a távolkeleti cégek erős versenye is várható. Lehetséges, hogy egyszerűbb navigációs vevőtípusok 500\$-ért lesznek kaphatók. A geodéziai munkához szükséges kétfrekvenciás vevők valamivel drágábbak maradnak, mert a kereslet irántuk sokkal kisebb mértékű.

A HELYMEGHATÁROZÁSRÓL ÁLTALÁBAN



A KÖZEPES FÖLDI KOORDINÁTARENSZER (CT)

7.00 A helymeghatározásról általában

Két alapjában eltérő koordináta meghatározásról beszélhetünk:

1. Egy jól definiált koordinátarendszerben egy pont három koordinátájának meghatározását abszolút meghatározásnak nevezzük.
2. Egy pont megadását egy másik ponthoz képest relativ meghatározásnak nevezzük. Ekkor a koordinátarendszer origója a rögzített pontban van.

Műholdas helymeghatározásnál az első esetben a koordinátarendszert a műholdak pályáin keresztül definiálják a pályát követő állomások helyének rögzítésével. Az így definiált rendszer globális földi rendszer és jól megközelíti a közepes földi koordinátarendszert, mégsem célszerű abszolútnak nevezni, mert ezeknek a megoldásoknak végtelen változata lehetséges. Javasoljuk ezért inkább a geocentrikus elnevezést használni.

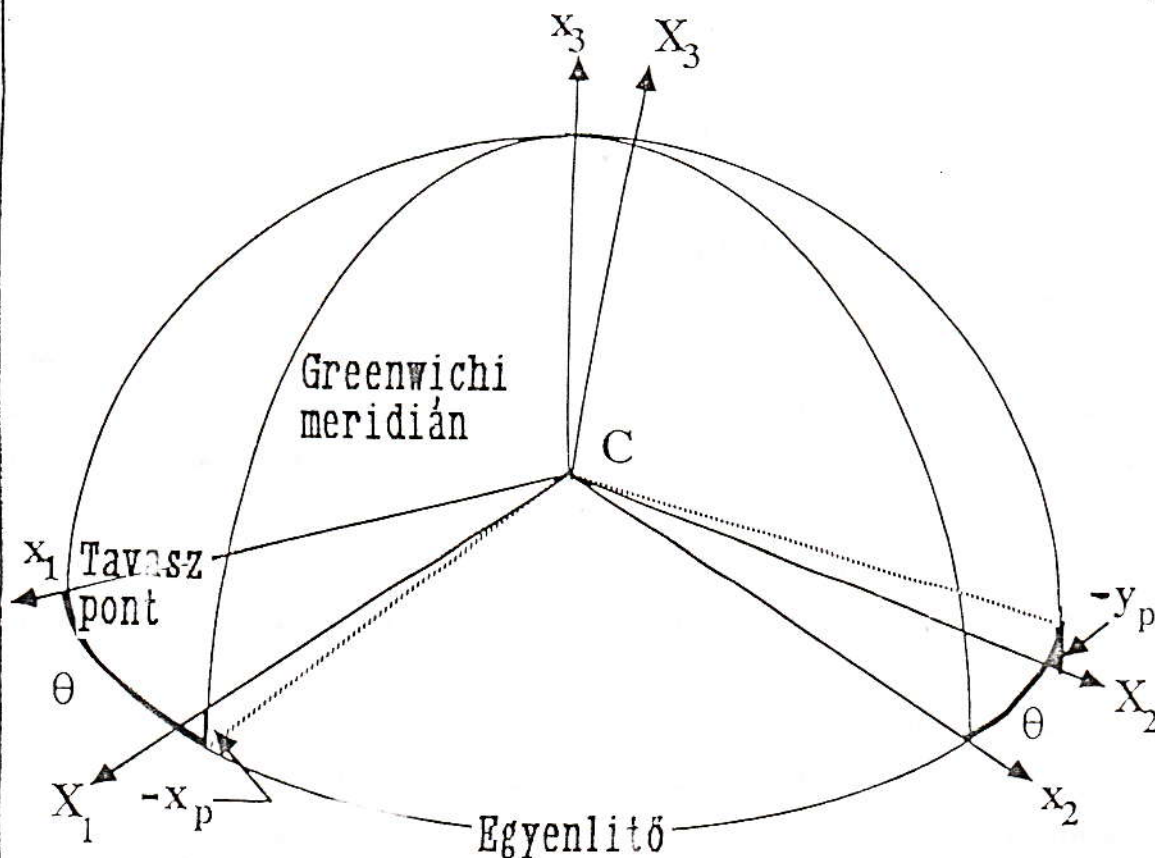
A második esetet nevezik még differenciális helymeghatározásnak is.

Ha a meghatározandó pont helye rögzített, akkor statikus, ha mozog, akkor kinematikus meghatározásról beszélünk.

A geodéziában általában a statikus módszert alkalmazzák, elsősorban a nagy pontossági igények miatt, de a műszerek technikai színvonalának emelkedésével a kinematikus technika is fényes jövő előtt áll, elsősorban a gyors terepi felmérések területén.

A kinematikus megoldásokat elsősorban a különböző járművek navigálása céljára használják.

KOORDINÁTARENDSEZEREK



A műhold mozgása ismert az RA (x_1, x_2, x_3) r. ben
 A földi helymeghatározást a CT (X_1, X_2, X_3)
 rendszerben végezzük

A két rendszer közötti kapcsolatot:

- Greenwichi csillagidő (θ)
- Pólusmozgás komponensei (x_p, y_p)

7.01 Koordinátarendszerek

A holdak mozgását első közelítésben Newton törvénye írja le, amelyik kimondja, hogy a szabadon eső test tömegközéppontjának a gyorsulása arányos a ráható erővel. Az arányszám pedig a test tömege. A helyzet, a sebesség, a gyorsulás és az erő komponensei egy speciális koordinátarendszerben, az un. inerciális rendszerben érvényesek.

Az inerciális koordinátarendszer durva közelítésben egy gyorsulásmentes tér. A műholdak mozgásának leírására a legalkalmasabb inerciális rendszer az egyenlítői koordinátarendszer (RA) amelyben rektaszcenzióval és deklinációval jellemzünk egy pontot az éggömbbön.

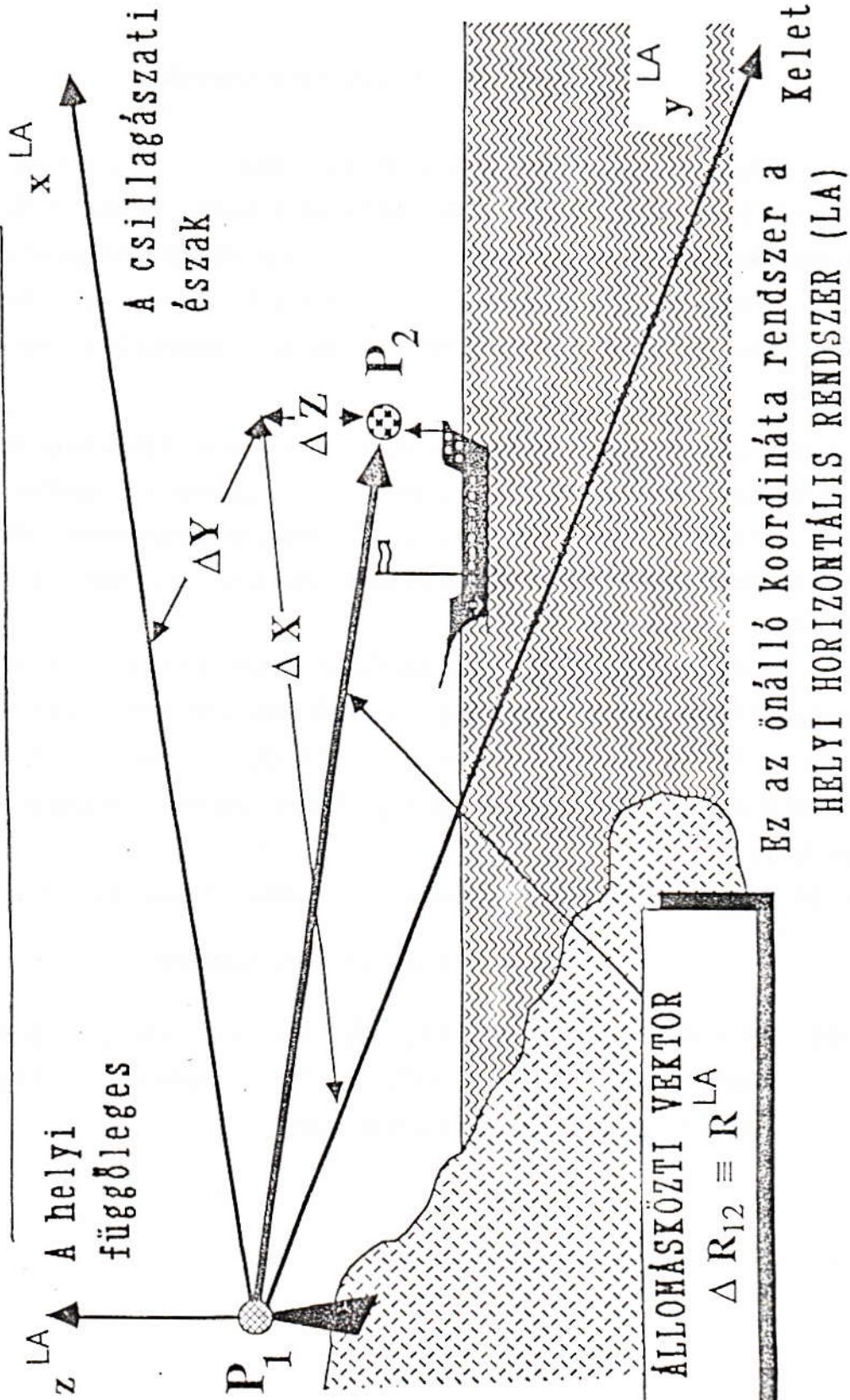
Ez a rendszer azonban nem alkalmas földi helymeghatározásra ezért definiálnunk kell egy a szilárd-földhöz kötött rendszert, az un. közepes földi koordinátarendszert (CT), amelynek Z tengelye a CIO pólusra mutat, X tengelye pedig a Greenwichi meridiánon megy keresztül.

Az RA és CT rendszerek között az alábbi összefüggés érvényes:

$$R = R_2(-x_p)R_1(-y_p)R_3(\theta)r$$

ahol θ a Greenwichi csillagidő, x_p és y_p pedig a pólusmozgás összetevői, R és r a CT és RA rendszerek koordinátái és R_i ($i=1,2,3$) a forgató mátrixok.

RELATIV HELYMEGHATÁROZÁS



ÁLLÓHÁSKÖZTI VEKTOR
 $\Delta R_{12} \equiv R^{LA}$

Ez az önálló koordináta rendszer a
 HELYI HORIZONTÁLIS RENDSZER (LA)

7.02 Relatív helymeghatározás

A relatív helymeghatározási módszer nagy jelentőségű a geodéziai gyakorlatban, partmenti tengeri területek térképezésénél, önálló koordinátarendszerek kialakításánál.

Minden helyi koordinátarendszert fel lehet használni relatív helymeghatározásra. Használhatjuk pl. a csillagok alapján kijelölt horizontális (LA) rendszert tájékozásra, amint ez az ábrán látható.

Tegyük fel, hogy az R_1 vektor a P_1 pontba mutat, és a helyi rendszerben ismerjük a P_1 -ről P_2 -be mutató differencia vektort,

$$\Delta R_{12}(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$$

ugyanabban a koordináta rendszerben. Ekkor a vektoregyenlet:

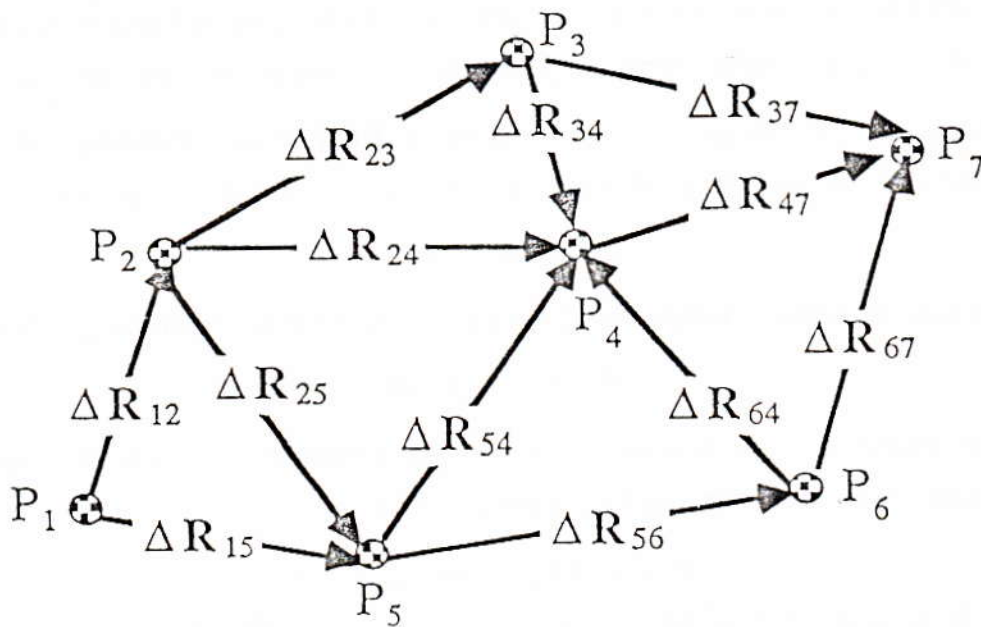
$$R_2 = R_1 + \Delta R_{12}$$

Ha ΔR_{12} vektort egy másik koordináta rendszerben kell meghatározni akkor transzformációt kell végrehajtani:

$$\Delta R_{12} = R(\omega_x, \omega_y, \omega_z) \Delta R_{12}$$

ahol R a forgató mátrix és $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ a két rendszer tengelyei-nek irányeltérései. Megjegyezzük, hogy ezt a módszert használják a kinematikus pontmeghatározásnál is.

HÁLÓZATFEJLESZTÉS



Valamennyi ΔR_{ij} ugyanabban a koordináta-rendszerben adott mint R_1 . Így pl:

$$R_7 = R_1 + \Delta R_{12} + \Delta R_{24} + \Delta R_{47}$$

7.03 Hálózatfejlesztés

A geodéziai gyakorlatban gyakran igen előnyös nagyszámú pontot egy közös hálózatban meghatározni. Az ilyen együttes meghatározás jelentős mennyiségű fölös adatot tartalmaz (például a 7. pontot az 1.-ből kiindulva többféleképpen is megkaphatjuk), ezért a hálózat geometriailag stabilabb, jobban határozott mint a transzlokáció. A hálózat minden oldala egy-egy vektor és minden pontpár egy-egy relatív helymeghatározás.

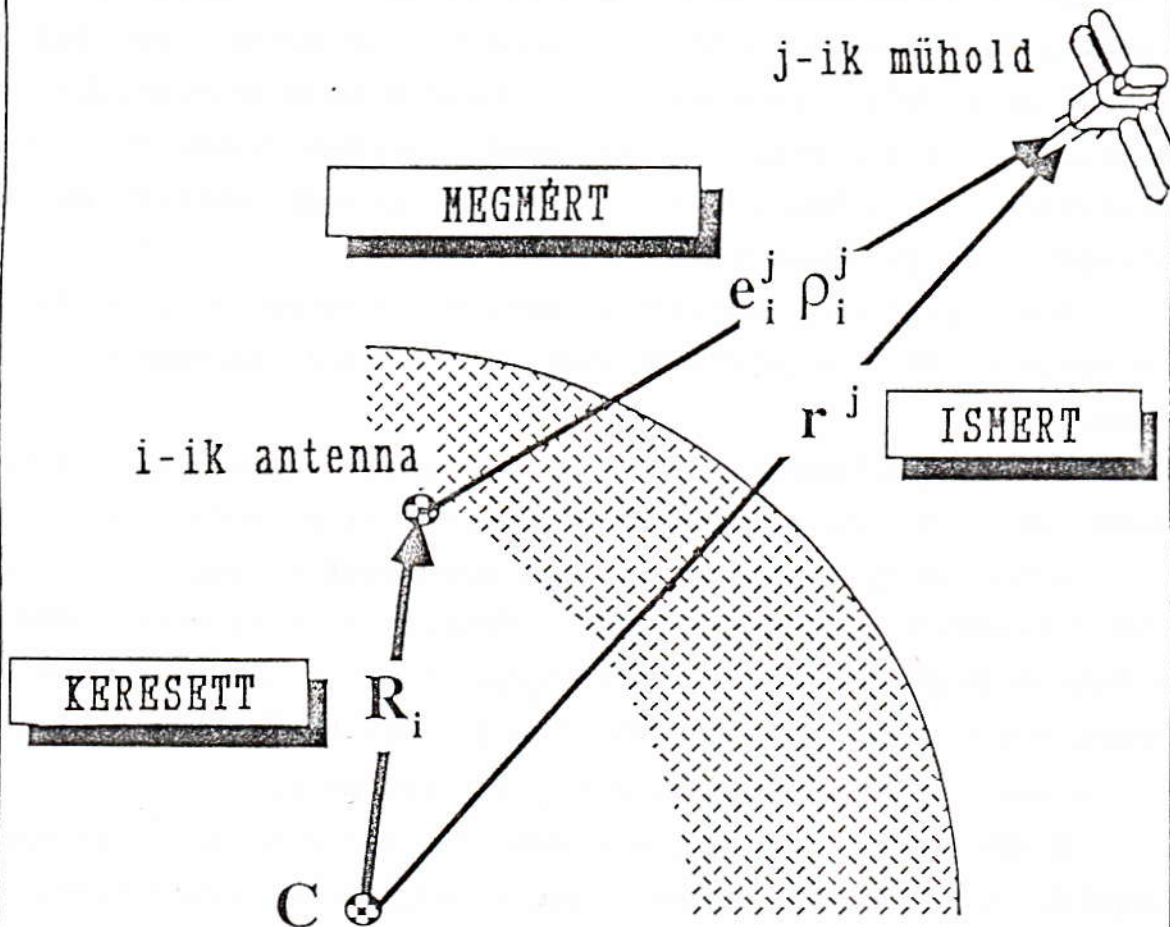
A kiegyenlített hálózat ellentmondásmentes, a számítás során az egyes hibák a megadott szempontok (súlyok) arányában szétosztódnak.

A szabatos helymeghatározást általában relatív mérési technikával végezzük. Ez alapmódszere a geodéziai gyakorlatnak.

A hagyományos geodéziában két egymástól eltérő hálózatot különböztetünk meg: A vízszintes hálózatban a vízszintes koordináták a lehető legpontosabbak, a magassági koordináták pontossága viszont nem elsődleges szempont. A magassági hálózatban mindez fordítva van. A két hálózat helyileg is elkülönül.

A GPS technikában az említett két hálózat a háromdimenziós megoldás miatt eleve egyesül, ami kétségtelenül egységesebb, homogénebb megoldás, viszont a kapott koordináták elveszítik szemléletességüket. A probléma megfelelő transzformációs eljárással áthidalható.

A MŰHOLDAS HELYMEGHATÁROZÁS ALAPELVE



$$R_i = r^j - e_i^j \rho_i^j$$

R_i az i -ik antenna helyzetvektora

r^j a j -ik műhold helyzetvektora

$e_i^j \rho_i^j$ a mért különbség vektor

7.04 A műholdas helymeghatározás alapelve

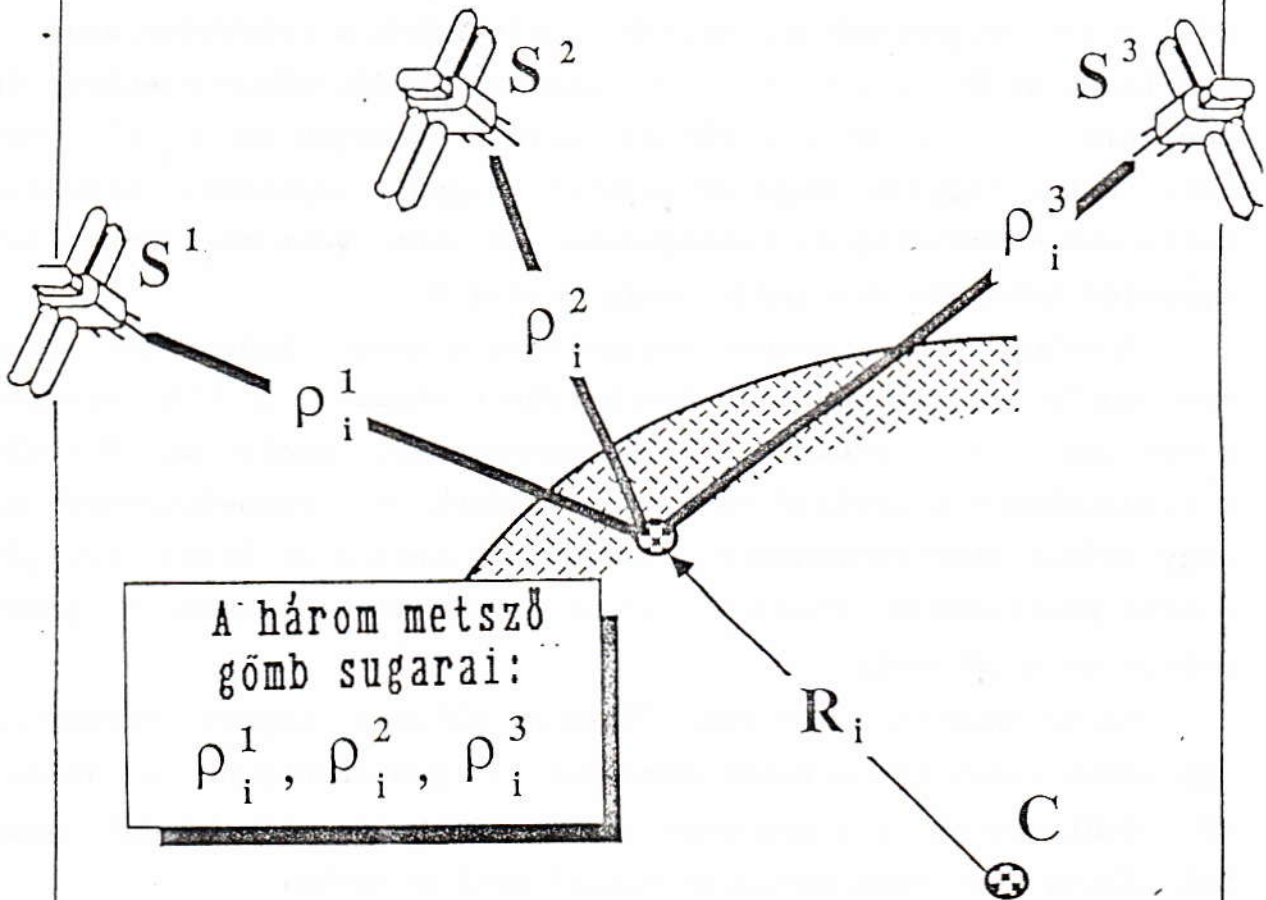
A műholdas helymeghatározás azt jelenti, hogy a műholdak segítségével határozzunk meg pontokat, általában a földfelszínen. A feladat az R_i vektor meghatározása, amely általános esetben úgy történik, hogy ismerjük a műhold helyét és mérjük az $e_i^j \rho_i^j$ vektort. Attól függően, hogy ez utóbbit hogyan végezzük, beszélünk különböző meghatározási technikáról. (A mért vektort közvetlenül egyetlen technika sem tudja szolgáltatni.)

A műholdak pillanatnyi helyzetének ismerete igen nehéz feladat, amely az égimechanika tárgykörébe tartozik. A GPS esetében ismeretes az ún. fedélzeti pályaelemrendszer, amely az észlelés pillanatában - megfelelő vevő segítségével - rendelkezésre áll vagy számos utófeldolgozásra ráállt követőrendszer által szolgáltatott pályaadatok, amelyek - mivel nem előrejelzések - pontosabbak az előbbinél.

Ha az antenna helye nem változik, akkor a kapott eredmények egy adott hibahatáron belül azonosak. A gyakorlatban az antenna fáziscentruma sokszor nem esik egybe a meghatározni kívánt ponttal. Ilyen esetekben külpontossággal kell számolni.

Mozgó antenna esetén kinematikus helymeghatározásról beszélünk. Ebben az esetben R_i -t folyamatosan újraszámítjuk.

GEOCENTRIKUS MEGHATÁROZÁS MŰHOLDAS TÁVOLSÁGMÉRÉSEKSEL



A három metsző
gömb sugarai:

$$\rho_i^1, \rho_i^2, \rho_i^3$$

ISMERT: r^1, r^2, r^3

ÉSZLELT: $\rho_i^1, \rho_i^2, \rho_i^3$

KERESETT: R_i

$$\|r^j - R_i\| = \rho_i^j \quad j = 1, 2, 3$$

7.05 Geocentrikus helymeghatározás műholdas távolságmérésekkel

A távolságmérésekre alapozott helymeghatározás igen hatékony. Ismeretes, hogy a háromdimenziós koordináta meghatározáshoz három, nem egy síkba eső távolság szükséges. Ha ezek a távolságok műholdakra irányulnak, akkor a kimetszett pont is a holdak rendszerében azaz geocentrikus rendszerben válik ismertté.

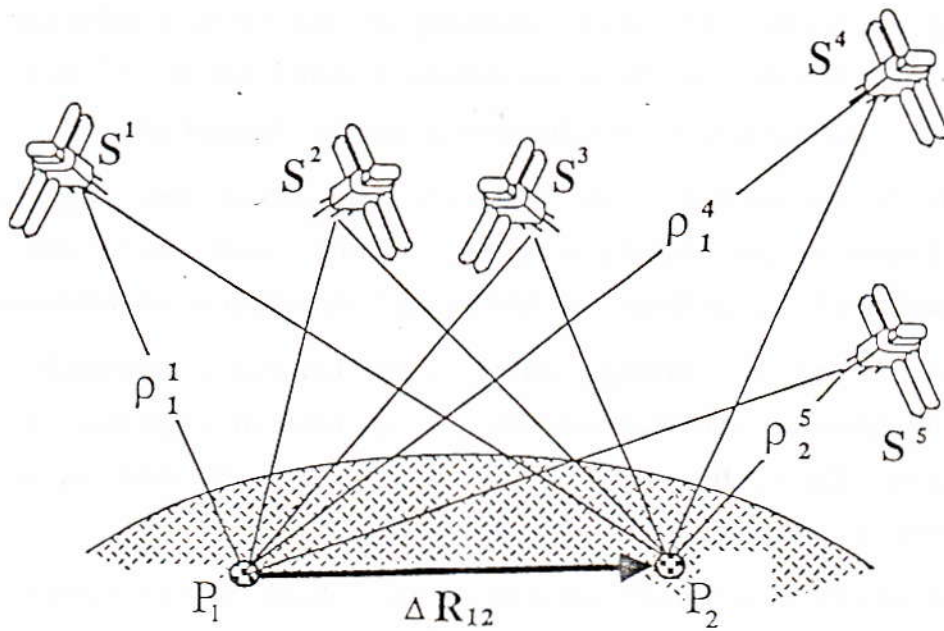
Ha R_i az antenna fix felállítású, akkor azt meg lehet határozni három (vagy több), nem egy síkba eső távolság mérésével, amelyeket eltérő időben és különböző holdakra is mérhetünk.

Ha az antenna mozog, akkor a pillanatnyi pozíció meghatározásához ugyancsak minimum három, de egyidőben végzett távolságmérés szükséges. Ez egyben azt is jelenti, hogy az antenna helyétől legalább három holdat kell egyszerre látni.

Az elektromágneses hullámok különböző spektrumait használják távolságmérésre. A látható tartományt használja pl. a lézertechnika.

A Tranzit Doppler rendszer 150 és 400 MHz, a GPS 1.2 és 1.5 GHz frekvencián, egy másikkimikrohullámú technika mint pl. a PRARE rendszer 8 GHz-en működik. A legpontosabb közülük a lézer, de jelentős gyakorlati korlátai miatt (költséges, időjárás függő) nem hatékony. A műholdakra végzett lézeres távolságmérés pontossága eléri a cm-es értéket.

RELATÍV HELYMEGHATÁROZÁS MŰHOLDAKRA VÉGZETT MÉRÉSEKKEL



$$R_1 = r^j - e_1^j \rho_1^j$$

$$R_2 = r^j - e_2^j \rho_2^j$$

$$\Delta R_{12} = R_2 - R_1 = e_2^j \rho_2^j - e_1^j \rho_1^j = \Delta e_{12}^j \rho_{12}^j$$

7.06 Relatív helymeghatározás műholdakra végzett mérésekkel

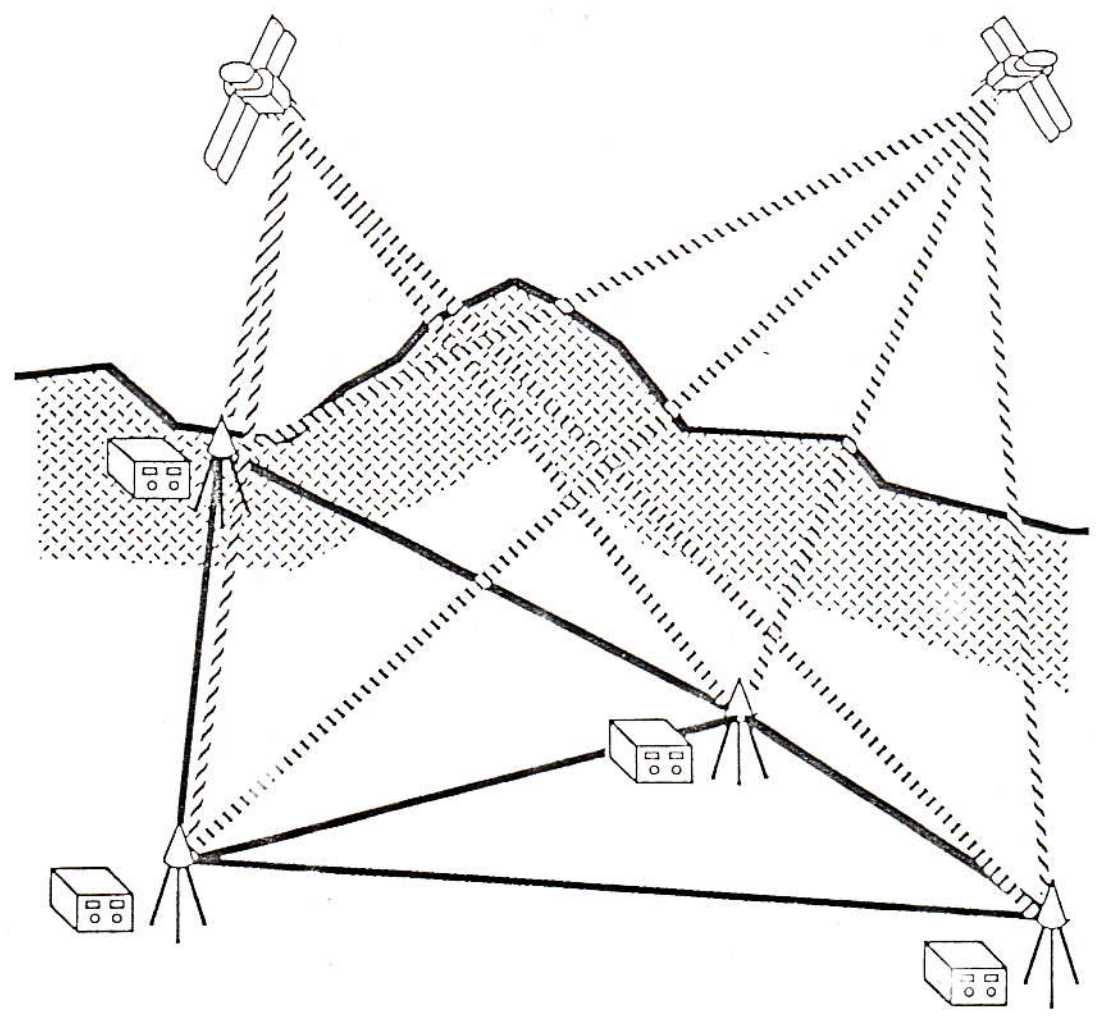
A mikrohullámú műholdas helymeghatározásnál lényegében két típusú méréssel találkozunk, a távolság és a távolság különbség módszerrel. Az előbbi igen pontos időmérést igényel, hiszen az elektromágneses hullám 1 ns alatt 30 cm-t tesz meg. A távolság különbség mérésnél általában a fázismérési technikával találkozunk az itt jelentkező probléma az egész hullámok számának határozatlansága. Általánosan használt módszer a doppleres technika (pl. a Tranzit Doppler rendszer), ahol a műholdon elhelyezett és az vevőben lévő oszcillátorok a relativ mozgás következtében bekövetkezett frekvencia csúszást használják fel a vevő helyének meghatározására úgy, hogy időegységenként integrálják az egész periódusok számát. A mikrohullámú műholdas helymeghatározás megbízhatóságát jelentősen befolyásolják az időmérés hibái, az atmoszférikus terjedés jelenségei és a műholdak pályahibái.

Ezeket a hibaforrásokat, ill. azok nagy részét ki lehet ejteni, vagy jelentősen csökkenteni, ha a meghatározandó mennyiségek nem geocentrikus, hanem relativ koordináták. Más szavakkal, sokkal pontosabban lehet relativ helymeghatározást végezni, mint egy pontot meghatározni geocentrikus rendszerben. Ez érvényes mindkét mérési típusra.

Még hatásosabb módszer, ha a két ponton végzett mérések nem eltérő időben, hanem szimultán történnek. A Doppler-technikában ezt a módszert transzlokációnak nevezik.

A jelenleg elérhető pontosságok a relativ meghatározásban a Doppler technikánál 5-10 ppm, a GPS technikánál pedig 0.1-2 ppm.

HÁLÓZATMÉRÉS TÖBB VEVŐVEL



7.07 Hálózatmérés több vevővel

A meghatározás pontosságát lényegesen megjavíthatjuk, ha több vevővel dolgozunk egyszerre. Egy ilyen hálózat geometriailag jóval határozottabb mint a sorozatos transzlokációs megoldás, mert az egyidejű észlelések esetén csökken a pályák száma, ami a legjelentősebb hibaforrás. Ezenkívül a körülmények azonossága is (légköri tényezők, egyszeri pontraállítás stb.) kedvezően hat.

Megjegyezzük, hogy ha csupán egy bázisvonal meghatározása is a cél, de több vevő áll rendelkezésünkre, akkor is érdemes egy hálózatba foglalni a kérdéses bázisvonalat.

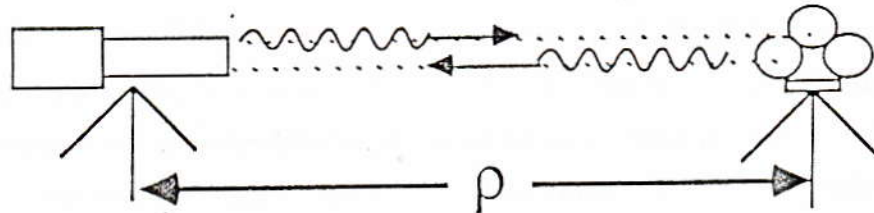
A több vevővel végzett hálózatmérés a vevők számának növelésével egyre gazdaságosabb - ami nem elhanyagolható szempont - mivel az egy időben kapott bázisvonalak száma

$$n = \binom{N}{2}$$

ahol N a vevők száma.

A TÁVOLSÁGMÉRÉS ELVE

KÉTUTAS TÁVOLSÁGMÉRÉS

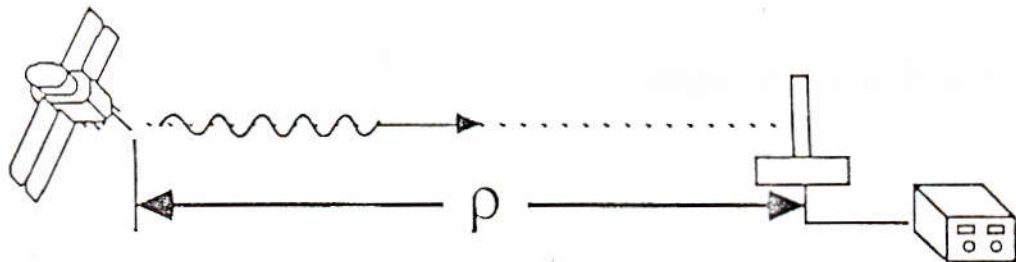


Mérendő $\Delta t = 2\rho / c =$ kétutas terjedési idő
 Számítandó $\rho = c \Delta t / 2$

Egy óra mérése Δt

Egy felhasználói rendszer

EGYUTAS TÁVOLSÁGMÉRÉS



Mérendő $\Delta t = \rho / c =$ egyutas terjedési idő
 Számítandó $\rho = c \Delta t$

A műhold órája előállítja a jelet

A vevő órája detektálja az érkező jelet

A két órának azonos rendszerben kell járnia
 (1 mikrosec hiba = 300 m távolsághibát okoz)

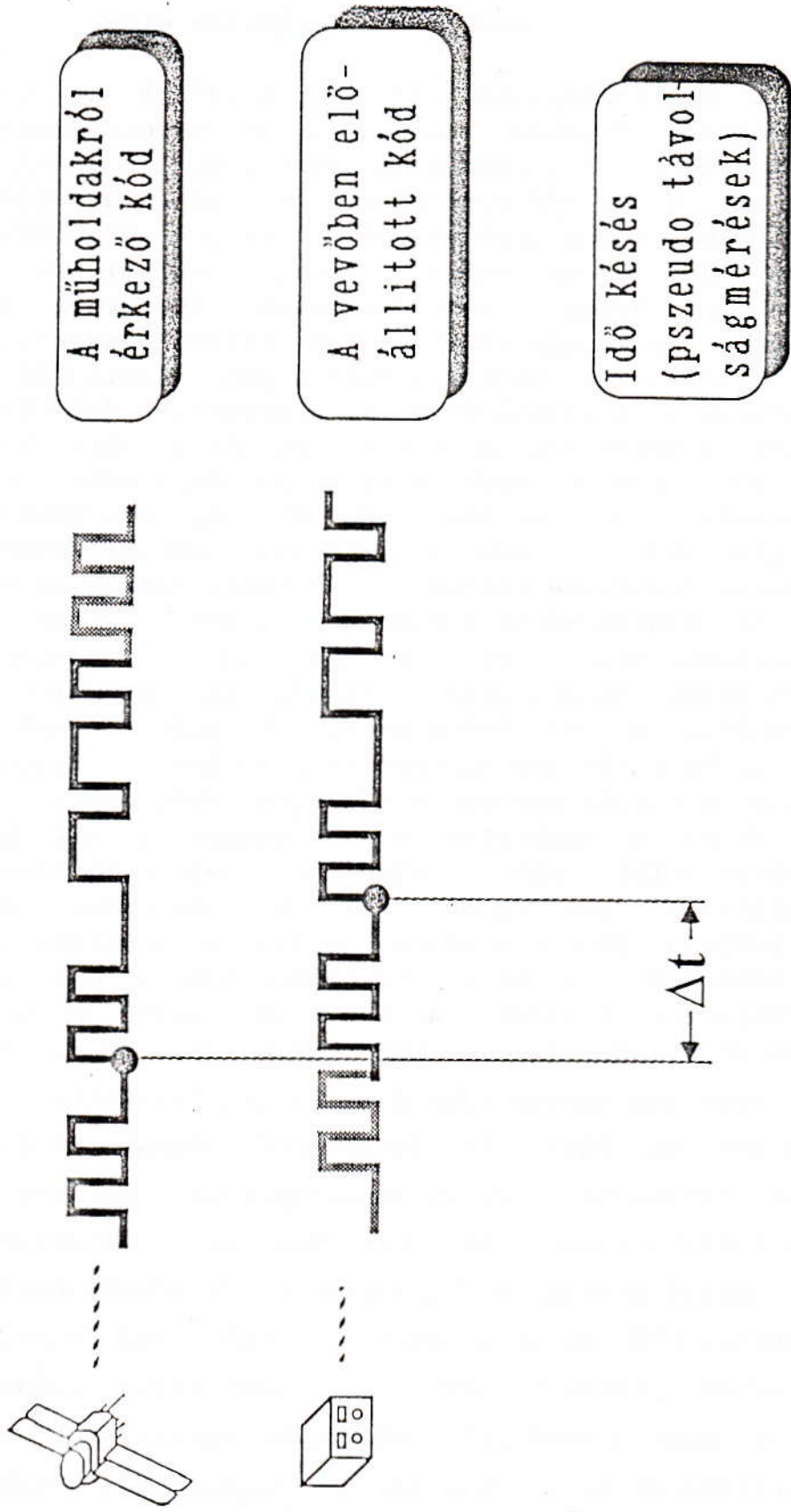
8.00 A távolságmérés elve

Az elektromágneses jel segítségével kétféle távolságmérés lehetséges: egyutas, vagy kétutas távolságmérés. A kétutas távolságmérés koncepciója az egyszerűbb. Az időmérést egyetlen óra vezérli, ami az adó-vevő műszerben van elhelyezve. A távmérési vonal másik végén levő eszköz valamilyen módon reagál a beérkező jelre. Ha ez az eszköz passzív (valamilyen céltárgy, vagy reflektor), akkor egyszerűen csak visszaveri a jelet a vevő irányába. Ha ez egy aktív eszköz (transzponder), akkor a beérkező jel hatására egy külön visszatérő jelet állít elő, de úgy, hogy az időkapcsolat a bejövő és a visszasugárzott jel között állandó és ismert. A mérés maga a rendszeróra által mért kétutas terjedési idő. A kétutas mérésnek az egyik hátránya lehet, ha a céltárgyat referenciaállomásnak tekintjük, mert egy adó-vevő teljes egészében lefoglalhatja magának a használat során, ezért az egyidejű felhasználók száma nagyon korlátozott, legtöbbször csak egy.

Az egyutas mérés - mint amit a GPS is használ - sokkal bonyolultabb. Minden végpont (az adó és a vevő) külön órával rendelkezik. Az adó órája állítja elő a jelet. A vevő órája detektálja a jel beérkezését. Mindkét órának egyformán kell járnia. Ha a két óra szinkronizációjában 1 mikrosekundumos hiba van, ez a távolságmérésben 300 m-es hibát okoz.

Mivel a gyakorlatban lehetetlen a két órát tökéletesen szinkronizálni, ezt a műveletet matematikailag végzik el. Általában mindkét órának saját járása és állása van. Ha azonban a két időbázis kötött a kapcsolat ismert, az órákat szinkronizáltnak tekinthetjük. A probléma természetesen a két időbázis közötti kapcsolat megtalálása. A GPS csak azért működhet, mert feltehetjük, hogy minden GPS szatellita órája egymáshoz szinkronizálva van (matematikailag, és nem fizikailag). Ezt a szatellita óráknak földi GPS állomásokról végzett gondos ellenőrzésével valósíthatják meg. Ennek eredményeként a matematikai korrekciókat a szatellita üzenetekben helyezik el, amelyeket azután minden felhasználó megkap. A felhasználók feltételezhetik, hogy minden szimultán GPS távolság, amit a vevőjükkel mérnek, ugyanarra a fiktív óraállásra vonatkozik a szatellita oldalon. Később látni fogjuk, hogy a vevő órájának szinkronizálása ehhez a közös, fiktív szatellita órához ezután már nem jelent komoly nehézséget.

PSZEUDO TÁVOLSÁGMÉRÉSEK



8.01 Pszeudo távolságmérések

Egy GPS vevő lényegében csak két típusú mérést képes végezni: pszeudo távolságmérést és lekevert hordozó fázismérést.

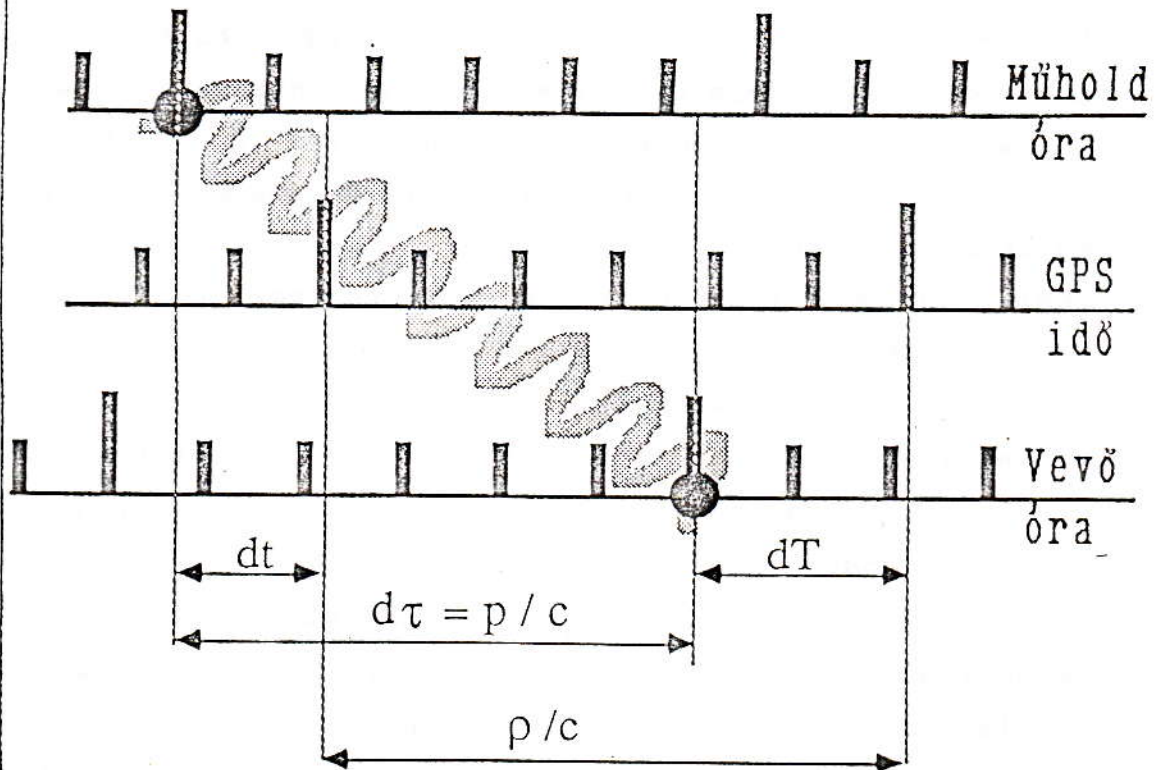
A pszeudo távolság a szatellita által küldött jel és a reprodukált vevő kód illesztéséhez szükséges időkézés megszorozva a fénysebességgel. Ideális esetben ez az időeltolás a szatellita jel kibocsájtási ideje (a szatellita időrendszerében) és a vevőbe érkezés ideje (a vevő időrendszerében mérve) közti különbség. A valóságban a két időrendszer különbözik egymástól, ami egy szisztematikus hibát okoz a mérésben. Erre a szisztematikus hibával terhelt időkézés, illetve távolságmérésre vonatkozik a "pszeudo távolság" kifejezés.

A pszeudo távolságokat a korrelációs detektor méri, amely vezérli a késés rákapcsolási hurkot, és ez utóbbi biztosítja a vett kód és a vevő által generált kód egybeesését. Egyszerű szavakkal kifejezve a kódkorrelációs koncepció alatt azt értjük, hogy a vevőben előállítjuk a kód sorozat másolatát (+1 és -1 értékek szekvenciáját) és ezt a kód másolatot időben egymásra fektetjük (korreláljuk) a bejövő jellel. A két jelsorozat egyezése azt jelenti, hogy a két kódot egymással összeszorozva csak +1 értékek adódnak.

A pszeudo távolságmérés tehát azzal a késési idővel ekvivalens, amit a vevő órájához hozzá kell adni, hogy a belső és a bejövő kód korrelációban álljon.

A pszeudo távolságmérések pontosságára megközelítőleg azt mondhatjuk, hogy az körülbelül 1%-a a kód periódus hosszának. A P kódnál a kód periódusok 0,1 mikrosecundumként követik egymást, ami körülbelül egy nanosecundumos mérési pontosságot jelent. A fénysebességgel megszorozva ez 30 cm-nek felel meg. A C/A kód esetében a pontosság ennek tized része, tehát mintegy 3 m.

PSZEUDO TÁVOLSÁG ÉSZLELESEK



$$p = \rho + c \cdot (dt - dT) + d_{\text{ion}} + d_{\text{trop}}$$

8.02 Pszeudo távolság megfigyelések

A pszeudo távolság észlelési mennyiség a d_r a szatellita jel kibocsájtásának időpontja (a t szatellita időskálán) és a vevőbe érkezés időpontja (a T vevő időskálán) különbsége. A szatellita és vevő időskálák mellett a GPS időskálával is számolnunk kell, amely többé-kevésbé megközelíti az ideális időskálát.

$$d_r = T(\tau_b) - t(\tau_a).$$

Hozzáadva és levonva az eltelt GPS időt

$$d_r = (\tau_b - \tau_a) + [t(\tau_a) - T(\tau_b)].$$

Ideális esetben az első tag a jel terjedési ideje, amely megszorozva a c fénysebességgel (vákumban 299 792 458 m/sec) megfelel a vevő és a szatellita közötti ρ távolságnak a légköri effektusokat elhanyagolva. A második tag a dt eltérést adja a szatellita óra és a GPS idő között. A harmadik tag a dT eltérést adja a vevő óra és a GPS idő között. Ha figyelembe vesszük az ionoszférikus és troposzférikus késéseket is, a teljes pszeudo távolság észlelési egyenlete a következő formában írható:

$$p = c \cdot d_r = \rho + c \cdot (dt - dT) + d_{ion} + d_{trop}$$

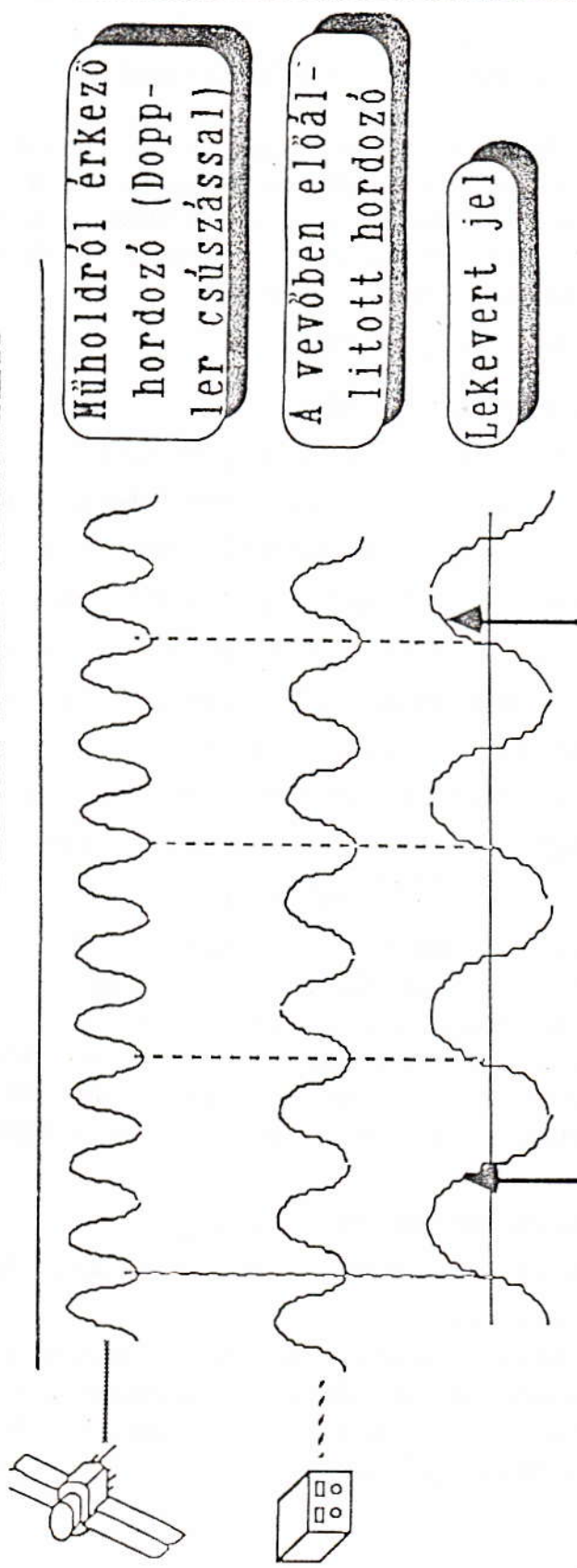
Minket a vevő koordinátái érdekelnek elsősorban. Hol találhatóak ezek ebben az egyenletben? A koordináták a ρ valódi távolságban vannak elrejtve. Ha a szatellita koordinátákat tökéletesen ismerjük, akkor a $\rho = |r - R|$, r azonban általában nem ismert tökéletesen és ezért egy $d\rho$ tagot is hozzáadunk, ami az efemerisz hibájának felel meg. Tehát $\rho = |r - R| + d\rho$. Az észlelési egyenlet akkor így alakul:

$$p = |r - R| + d\rho + c \cdot (dt - dT) + d_{ion} + d_{trop}$$

Ezt a következő formába is írhatjuk: $l = f(\underline{R}, \underline{r}, \underline{b})$, ahol \underline{b} a szisztematikus hibák együttes vektora.

Végül figyelembe kell vennünk sztohasztikus, vagy random effektusokat, amelyek a mérési zaj és egyéb random nem modellezett hatások eredményei. Ezeket az észlelési egyenlet jobb oldalán elhelyezett maradék tag foglalja magában.

LEKEVERT HORDOZÓFÁZIS MÉRÉSEK



Észlelt fázis: 120°

Teljes fázis: $360^\circ \cdot n + 120^\circ$

- Az n egész ciklusok száma
- nem észlelt, de a vevőben számlált
 - a jel elvesztése az n szám elvesztésével jár (ciklusugrás)
 - n kezdő értékét meg kell határozni (többértelműség)

8.03 Lekevert hordozófázis mérések

A lekevert fázis (carrier beat phase) annak a jelnek a fázisa, ami a vett frekvencia és a vevő által előállított konstans frekvencia különbségéből jön létre. Ezt az észlelési mennyiséget a korrelációs csatornából mint mellékterméket nyerhetjük. A négyzetelő csatorna felszorozza a vett jelet saját magával és így a hordozónak egy második harmonikusát nyerjük, amely nem tartalmazza a kód modulációt.

A négyzetelés elve könnyen megérthető, mert a hordozó hullám négyzetre emelésével illusztrálható.

$$y^2 = A^2 \cos^2(\omega t + \phi) = A^2 [1 + \cos(2\omega t + 2\phi)] / 2$$

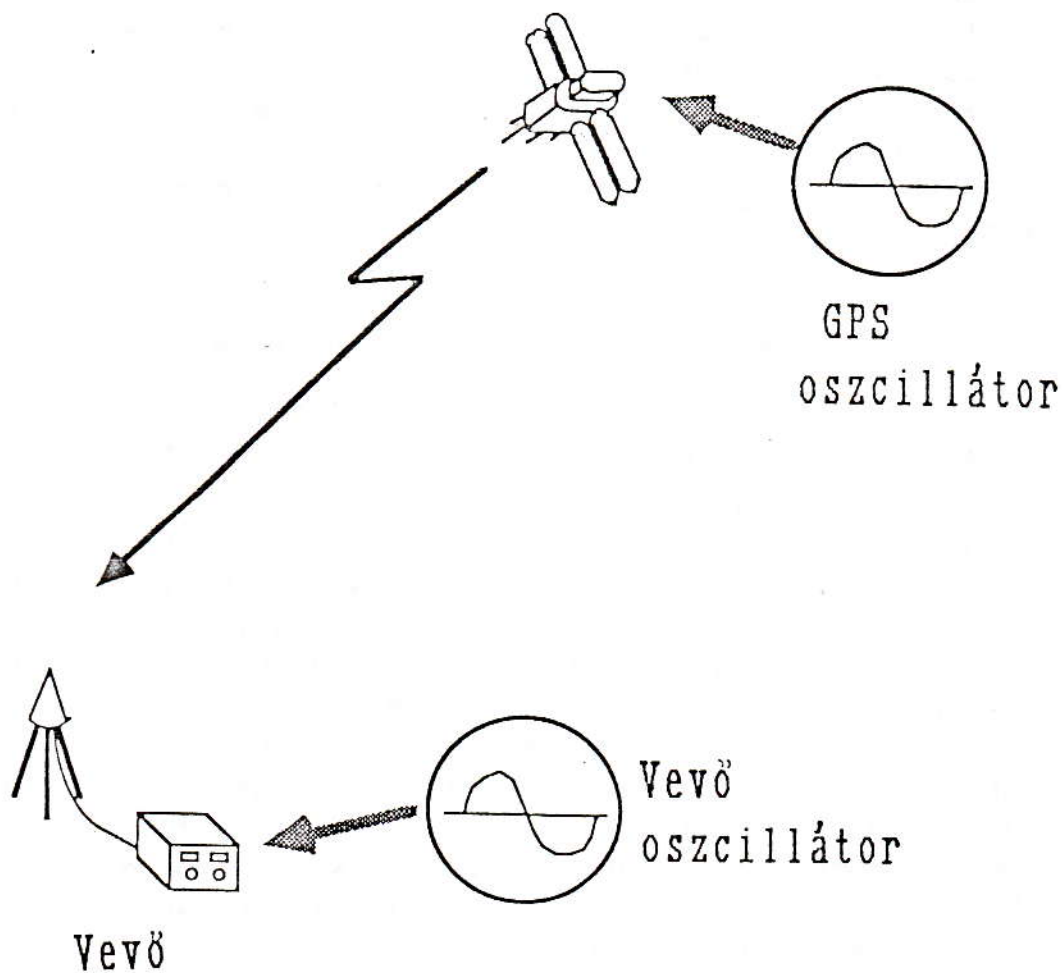
Mivel $A(t)$ a +1 és -1 kódértékek szekvenciája, amelyek a $A(t)^2 = A^2$ négyzetelés során mindig +1 értéket vesznek fel ezért A^2 kiejthető. Az eredményül kapott jel, y^2 maga a tiszta hordozó de az eredeti frekvencia kétszerese.

Mivel a hordozó hullámhossza sokkal rövidebb mint a kódoké, a lekevert hordozó fázismérések pontossága sokkal nagyobb mint a pseudo távolság kódoké. A GPS L1 hordozójel hullámhossza kb. 20 cm. Ha a fázismérés megbízhatóságát durva becsléssel a hullámhossz 1%-ra feltételezzük, akkor a pontosság 2 mm.

A lekevert hordozó fázismérésnek két hátrányát említjük, mindkettő a ciklus többértelműség problémájával függ össze.

1. A műhold és a vevő között a hordozó egész számú ciklusát meghatározni igen nehéz, vagy nem is lehetséges. Az egyik kiút, hogy a kezdeti ciklushibát állandónak tartjuk és a mérésekből mindig ugyanezt kivonjuk.
2. A szatellita és a vevők között a ciklus számlálás folyamatossága nem biztosítható. Különböző okokból, mint például zaj vagy antenna árnyékolás, minden vevőben fellépnek ún. ciklusugrások, vagy a koherens ciklusszámlálás megszakad. Ezek a ciklusugrások aprólékos utófeldolgozás segítségével, a legtöbb esetben kimutathatók és javíthatók. A ciklusugrások veszélye miatt a lekevert fázismérések nem alkalmasak azonos idejű alkalmazásokra (real time application).

LEKEVERT HORDOZÓFÁZIS ÉSZLELESEK



$$\phi = - (f/c) \cdot \rho - f \cdot (dt - dT) - (f/c) \cdot (-d_{\text{ion}} + d_{\text{trop}})$$

8.04 Lekevert hordozófázis észlelések

Egyes vevők, mint pl. a MACROMETER V-1000, vagy a TEXAS INSTRUMENTS TI-4100 képes a bejövő jel és a vevő által előállított jel közötti különbség mérésére. Ezt a különbséget nevezzük lekevert hordozó fázis észlelési mennyiségnek, vagyis annak a jelnek a fázisa, ami a szatellitánál bejövő doppler csúszást szenvedett jel és a névlegesen állandó vevő frekvencia összeültetéséből (keverés) származik.

$$\phi = \phi_i^k = \phi^k(t) - \phi_i(T),$$

ahol ϕ^k a kisugárzott jel fázisa a k szatellita által a t időpontban, és ϕ_i az i vevő fázisa T vételi időpontban (mindkettő ciklusegységben).

A lekevert hordozófázis modelljét két összefüggés segítségével adhatjuk meg.

1. A fázis/frekvencia összefüggés, amely nagystabilitású oszcillátorokra is csak rövid ideig érvényes

$$\phi(t + \delta t) = \phi(t) + f \cdot \delta t.$$

Ha $\delta t = T - t$ akkor

$$\phi_i(T) = \phi^k(t) + f \cdot (T - t),$$

és

$$\phi = \phi^k(t) - \phi_i(T) = -f \cdot (T - t).$$

2. A kisugárzás és a vétel időpontja közötti kapcsolat közelítőleg

$$t + dt + (\rho - d_{ion} + d_{trop})/c = T + dT,$$

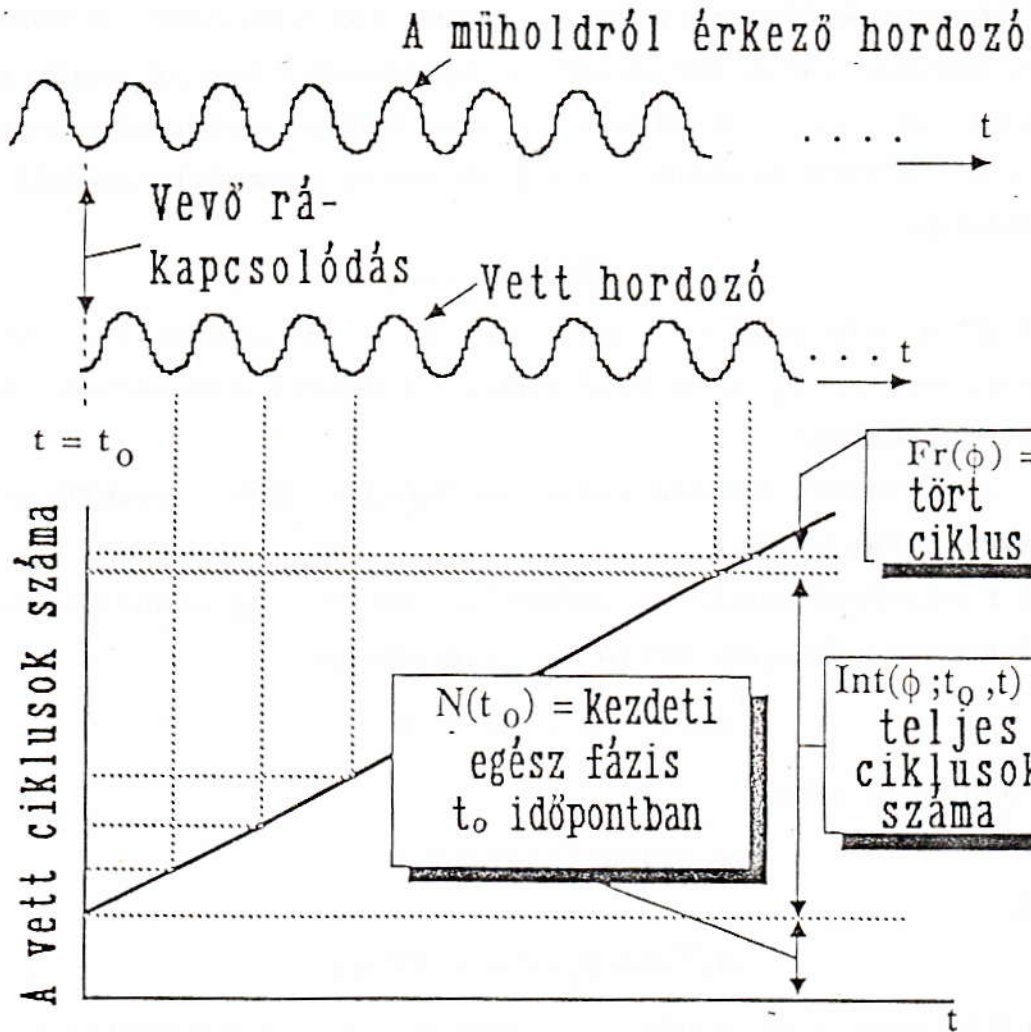
tehát

$$T - t = dt - dT + (\rho - d_{ion} + d_{trop})/c,$$

és az új lekevert hordozó fázis modell

$$\phi = -(f/c) \cdot \rho - f(dt - dT) - (f/c) \cdot (-d_{ion} + d_{trop}).$$

FOLYTONOS HORDOZÓFÁZIS



$$\Phi = \rho + c \cdot (dt - dT) + \lambda \cdot N - d_{ion} + d_{trop}$$

8.05 Folytonos hordozófázis

A gyakorlatban a lekevert hordozó fázismérés esetén egy adott időpontban a vevő óráját hasonlítjuk össze a bejövő jel fázisával anélkül, hogy tudnánk melyik ciklus képviseli a tökéletes ciklus-szinkronizációt. Tehát a teljes fázis a következő részekből áll: egy mért tört fázis értékből, egy egész számú ciklusszámból, ami a kezdeti t_0 epochától t -ig tart (ezalatt az idő alatt a vevő folyamatosan követi a jelet) és egy N ismeretlen egész számú ciklusból a t_0 kezdeti epochára vonatkozóan.

$$\phi_{\text{total}} = \text{Fr}(\phi) + \text{Int}(\phi; t_0, t) + N(t_0).$$

Az N ismeretlen ciklusszámot nevezzük ciklus többértelműségnek. Mindaddig, amíg a vevő folyamatosan követi a jelet (vagyis amíg az $\text{Int}(\phi; t_0, t)$ számot ismerjük) csak egy többértelműség van szatellitánként és vevőpáronként. Ha azonban az adatokban szakadás van, akkor számos többértelműség, vagy ciklusugrás adódik műholdanként.

Amit a vevő észlel: $\phi_{\text{mért}} = \text{Fr}(\phi) + \text{INT}(\phi; t_0, t).$

Ebből $\phi_{\text{total}} = \phi_{\text{mért}} + N(t_0).$

Egy szatellitára és egy vevőre, egy adott pillanatnyi lekevert hordozó fázis észlelési mennyiségre a következő egyenletet írhatjuk fel:

$$\phi_{\text{total}} = -(f/c) \cdot \rho - f \cdot (dt - dT) - (f/c) \cdot (-d_{\text{ion}} + d_{\text{trop}}) + N,$$

ahol a szatellita és a vevő oszcillátor különbsége a $f(dt - dT)$ tagba kerül, mint a szatellita és a vevő óráinak hibái.

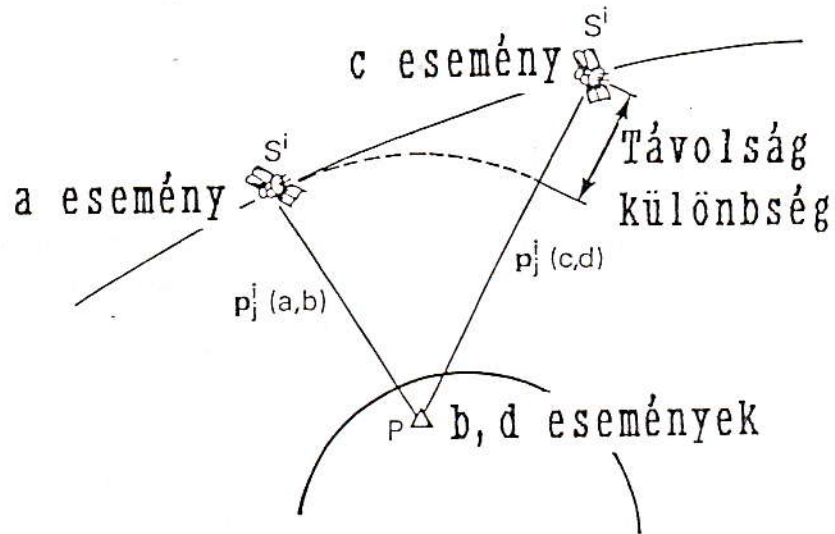
Megszorozva a hullámhosszal $\lambda = c/f$ és definiálva a $\phi = -\lambda \cdot \phi_{\text{mért}}$, megkaphatjuk a megfelelő hordozó fázis egyenletet (hosszuság egységben)

$$\phi = \rho + c \cdot (dt - dT) + \lambda \cdot N - d_{\text{ion}} + d_{\text{trop}},$$

ami már közvetlenül összehasonlítható a pszeudó távolság egyenlettel, kivéve a többértelműséget adó tagot. Nyilvánvaló, hogy a kezdeti többértelműségtől eltekintve N, ϕ úgy tekinthető, mint egy távolság és az észlelési egyenlet is csaknem ugyanolyan mint a szisztematikus hibával terhelt távolság egyenlete.

Az ilyen típusú mérés szisztematikus hibája ugyanolyan mint a pszeudó távolságoké, csak a többértelműséget adó tag járul hozzá.

INTEGRÁLT DOPPLER SZÁM



INTEGRÁLT DOPPLER SZÁM

$$N_j^i(b,d) = \int_{T_j(b)}^{T_j(d)} (F_j - F_j) dT_j$$

$$= (F_j - f^i) [T_j(b)] - \frac{f^i}{c} [\bar{p}_j^i(a,b) - \bar{p}_j^i(c,d)]$$

f^i sugárzott hordozó
 F_j állandó vevő frekvencia
 F_j vett hordozó frekvencia

8.06 Az integrált Doppler szám

A vett frekvencia különbözik a kisugárzott frekvenciától és egyben folyamatosan változik az adó és a vevő relatív sebessége következtében (Doppler effektus).

Az integrált Doppler szám a vett frekvencia és a vevő frekvencia közötti különbség egy adott idő intervallumra integrálva. Az integrált Doppler számra vonatkozó alapegyenlet:

$$N_j^i(b,d) = \int_{T_j(b)}^{T_j(d)} (F_j - F_j^i) dT_j = F_j [T_j(d) - T_j(b)] - \int_{T_j(b)}^{T_j(d)} F_j^i dT_j$$

ahol F_j a vevőben generált összehasonlító frekvencia.

F_j^i az i -dik műhold frekvenciája a j vevőben mérve. Mivel a $t^i(a)$ és a $t^i(c)$ intervallumban kisugárzott ciklusok száma meg kell egyezzen a vett ciklusok számával a $T_j(b)$ és a $T_j(d)$ időintervallumban, írhatjuk, hogy

$$\int_{T_j(b)}^{T_j(d)} F_j^i dT_j = \int_{t^i(a)}^{t^i(c)} f^i dt^i,$$

ahol az f^i az i szatellita által kisugárzott frekvencia, ezért:

$$N_j^i = F_j [T_j(d) - T_j(b)] - f^i [t^i(c) - t^i(a)]$$

Felhasználva a kapcsolatot a következők között:

$$T_j(b) = t^i(a) + \frac{\tilde{p}_j^i(a,b)}{c}$$

$$T_j(d) = t^i(c) + \frac{\tilde{p}_j^i(c,d)}{c}$$

Kifejezhetjük T_j -t t^i szerint

$$N_j^i(b,d) = (F_j - f^i) [t^i(c) - t^i(a)] + \frac{F_j}{c} [\tilde{p}_j^i(c,d) - \tilde{p}_j^i(a,b)]$$

ahol \tilde{p}_j^i a szatellita és a vevő közötti pszeudó távolság. Az integrált Doppler szám mint észlelési mennyiség, más paraméterek mellett, a pszeudó távolság különbség függvénye.

MEGFIGYELÉSI EGYENLETEK, HIBAHATÁSOK

MEGFIGYELÉSI TIPUSOK

- Pszeudo távolságmérés
- Lekevert vivőfázis mérés
- Folyamatos fázismérés

A MÉRÉSEK KOMBINÁCIÓI

- Epochaközi első differencia
- Vevőközi első differencia
- Szatellitaközi első differencia
- Vevő-idő második differencia
- Vevő-szatellita második differencia
- Vevő-szatellita-idő harmadik differencia

KORRELÁCIÓ AZ ÉSZLELÉSEK KÖZÖTT

9.00 Megfigyelési egyenletek, hibahatások

Az alábbi megfigyelési adatok állhatnak rendelkezésünkre:

- pszeudó-távolságmérések
- fáziskombináció mérések,
- folyamatos fázis mérései.

Feldolgozáskor a mérési típushoz illeszkedő linearizált egyenletekkel modellezzük az észlelés folyamatát. Angol szóhasználattal, ezek a megfigyelési egyenletek, a magyar szaknyelvben pedig a közvetítő egyenlet kifejezést használjuk.

A GPS észlelések mindig elképzelhetők állandó hibával terhelt (biased) távolságként. A modellekben ilyen állandó hibaként szerepeltetjük a vevő óra állását, a szatellita órájának állását, valamint az ionoszférikus és a troposzférikus késést. A fázismérés egyenlete tartalmaz még egy további lineáris hibát: kezdeti ciklus többértelműséget (ciklus darabszámot).

Gyakran a mérések első, második és harmadik differenciáit képezzük, miáltal lineárisan kombinált megfigyelési egyenleteket kapunk. Az ilyen egyenletek előnye bizonyos állandó hibák (a vevők, szatelliták óra állásának, a ciklus többértelműségének) kiejtése, más hibák (pályahibák, légköri modell hibák stb.) hatásának csökkentése.

A mérések lineáris kombinációinak (az egyszeres vagy többszörös differenciaképzésnek) van egy lényeges határa: a mérések közötti korreláció követése a többszöri összekapcsolás miatt nehézkes és matematikailag alig kezelhető.

ÁLLANDÓ ÉS EGYÉB HIBÁK

ÁLLANDÓ HIBÁK

MŰHOLD-FÜGGŐEK

- Pályahibák
- Műhold órájának állása

ÁLLOMÁS-FÜGGŐEK

- Vevő órájának állása
- Állomáskoordináták hibái

MÉRÉSTŐL FÜGGŐ HIBÁK

- Ionoszférikus késés
- Troposzféra modellhibája
- Fázis többértelműség

EGYÉB HIBÁK

- Maradék állandó hibák
- Ciklus ugrások
- Többutas terjedés
- Fáziscentrum mozgása
- Véletlen észlelési hibák

9.01 Állandó és egyéb hibák

A GPS mérésekre ható állandó hibák három fő csoportra oszthatók: szatellita-, állomás-, és mérés-függő állandó hibák.

A szatellita-függő állandó hibák: a pálya előrejelzés hibája és a szatellita fedélzetén működő óra állása a GPS időhöz képest (szinkronizációs hiba). Ezek az állandó hibák a szatelliták között korrelálatlanoknak tekinthetők. Hatással vannak minden típusú mérésre. Függenek a pályameghatározásban közreműködő követőállomások számától és elhelyezkedésétől, az alkalmazott pályamodellről és a szatellita geometriától.

Az állomás-függő állandó hibák: a vevőkészülék órájának állása a GPS időhöz képest és maga az állomáskoordináták hibája.

A mérés-függő állandó hibák: a jelek terjedésétől és a közegtől függő hibák (ionoszféra, troposzféra változásai a modellhez képest) és a fázismérésnél a ciklus többértelműség.

Az állandó hibák kiejthetők, vagy hatásuk csökkenthető, ha modellezük azokat. Egyébként funkcionálisan függenek az olyan argumentumoktól, mint az idő, hely, hőmérséklet, stb.

A GPS segítségével történő hely- és időmeghatározás függ a szatellita geometriától, a méréseket befolyásoló hibáktól, és a modellezések hibáitól. A mérési hibák terjedéséből a helymeghatározásra jutó hibahatár arányos az u.n. Dilution of Precision, DOP (a pontosság felhígulása) mennyiséggel. A DOP tulajdonképpen a GPS irodalomban elfogadott kifejezés, amelynek hálózatkiegyenlítési analógiája a hálózat "alakmátrixa".

A fenti hatásokból eredő hibák spektrális jellemzői összetettek és közöttük korreláció van. A GPS fejlesztések jelenlegi fázisában olyan hibamodelleket használunk, amelyekben a hibaforrásokból, azokat korrelálatlanoknak tekintve, u.n. ekvivalens távolsághibát képezünk (vagy képzelünk el).

ÉSZLELESI HIBÁK

SZABÁLY

A MÉRÉSEK FELBONTÁSA A
HULLÁMHOSSZAK KB. 1%-A

GPS JEL	HULLÁMHOSSZ λ	A λ 1%-A
C/A KÓD	300 m	3 m
P KÓD	30 m	30 cm
HORDOZÓ	20 cm	2 mm

MODELL HIBÁK

HIBA FORRÁS	TIPIKUS HIBA	TENNIVALÓ
HÜHOLD PÁLYA	20 m	differenciálni
ÓRA	10 m	differenciálni
TERJEDÉS IONOS.	30 m	diff. + frekv.
TROPOSZFÉRÁBAN	10 m	modell. és diff.
VEVŐ TÖBBUTAS TERJ.	10 m	antenna elhelyezés
ÓRA	300 m/ms	modellezés
ZAJ	mm - m	

9.02 Észlelési hibák

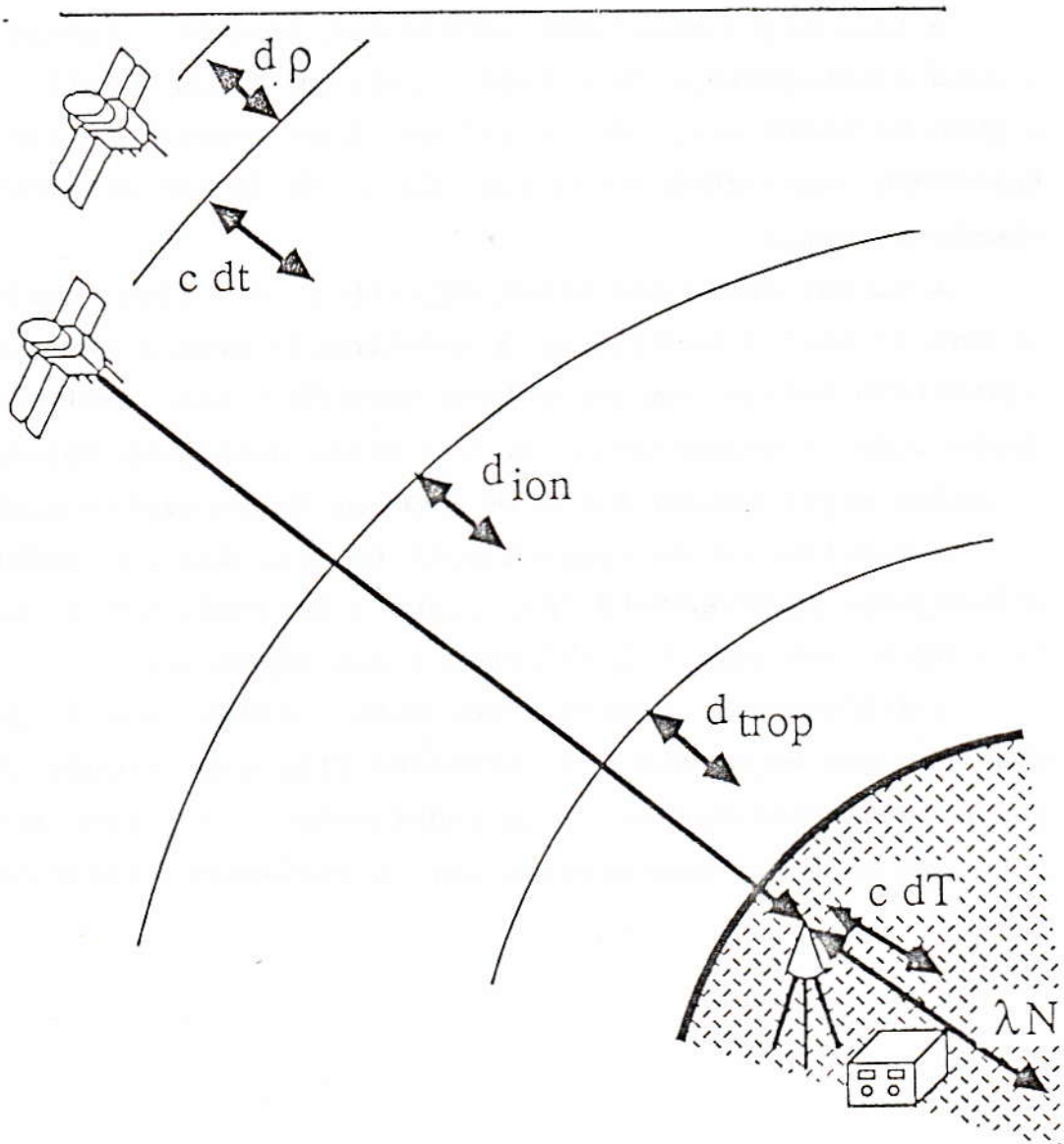
A távolságra vetítendő időkések további hibákkal terheltek a vevő elektronikája és véletlen jellegű zajok miatt. Általánosságban kijelenthető, hogy a jel hullámhosszával arányosak és igen különböző nagyságúak a C/A-kódú és a P-kódú távolságmérés és a fázismérés esetén.

A valódi észlelési hibák mellett a véletlen jellegűeket is tekinteni kell a modellben. A modellhibák azok a távolságban és a szatellita helyzetben jelentkező maradék hibák, amelyek a modellezés után is megmaradtak. Ezek a hibák általában károsabbak mint a valódi megfigyelési hibák és nemigen lehet azokat csökkenteni.

A modellhibák többsége kiejthető (pl. állandó időhibák) vagy erőteljesen csökkenthető (pl. légköri terjedés hibái, pályahibák), ha a mért távolságokból differenciákat képezünk.

A differencia képzés csökkentő hatása annál jobb, minél közelebb van egymáshoz két szinkronmegfigyelő állomás. A többutas terjedésből származó hiba nem modellezhető, egyetlen módon kerülhető: az antennát mentesíteni kell a reflektáló felületek közelségétől.

TÁVOLSÁGHIBÁVAL EKVIVALENS HIBÁK



Minden állandó hiba olyan mintha
távolságmérési hiba lenne,
hacsak nem ejtettük ki vagy modelleztük

9.03 Távolsághibával ekvivalens hibák

Gyakran hasznos, ha a különféle állandó hibákat a távolságra vetítjük. Az így kivetített hibák összegét ekvivalens állandó jellegű távolsághibának nevezzük, amellyel mintegy gondolatilag terheljük a mért távolságot (vagy annak megfelelőjét). Az egyes állandó hibák távolsághibaként az alábbi max. értéket vehetik fel:

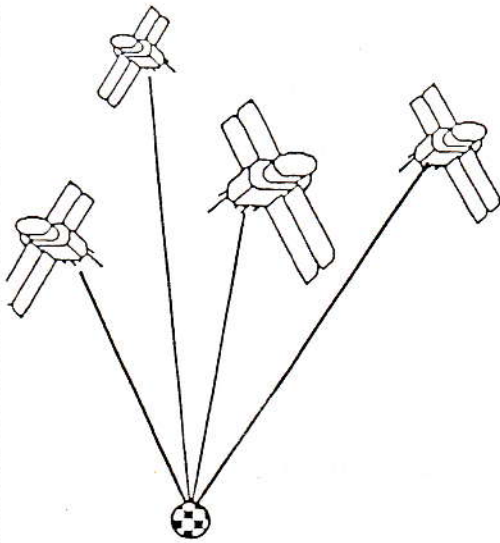
- szatellita óra állandó: 300 000 m (ami 10 m-re szorítható, ha az u.n. fedélzeti korrekciót figyelembe vesszük)
- vevő óra állandó: 10-100 m a vevőoszillátortól függően
- pálya hiba (állandó): 80 m a jelenlegi fedélzeti pályaadatokból kiindulva (ez 10 m-re szorítható le, ha külön követő hálózat működik a pálya meghatározására)
- ionoszféra késési hiba: 150 m a horizont környékén (50 m zenitben)
- troposzféra késési hiba: 20 m 10^0 magasságnál (2 m zenitben).

Az egyes hibahatások előjelei általában különbözőek, tehát összegük kisebb lehet mint abszolút értékük összege. Ennek ellenére jelenlétük kiküszöbölendő modellezéssel vagy differencia képzéssel.

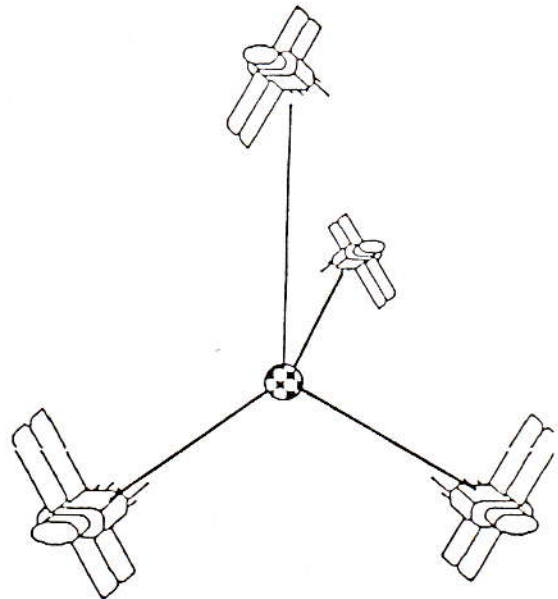
GPS GEOMETRIA ÉS PONTOSSÁG

$$\sigma = \text{DOP} \cdot \sigma_0$$

Helyzet hiba Geometria (A pontosság fellazulása) Mérési pontosság



Gyenge GDOP
 amikor a műholdak
 egy csomóban vannak



Jó GDOP
 - egy hold fent
 - három a horizonton
 - azimutkülönbség 120°

9.04 GPS geometria és pontosság

A GPS segítségével történő helymeghatározás pontossága a szatellita geometria konfigurációtól és a mérési pontosságtól függ. Általánosan elfogadott a GPS mérési pontosságra a "felhasználói ekvivalens távolság hiba" (UERE - angol elnevezés alapján) kifejezés, amely a különféle hibák egyben történő kezelésére utal.

A szatellita konfiguráció hatását a helymeghatározási pontosságra a DOP jelű "pontosság felhígulása" szorzó fejezi ki. Az alábbi változatai használatosak:

- $VDOP \cdot \sigma_0$ a magasság középhibája
- $HDOP \cdot \sigma_0$ a kétdimenziós vízszintes hiba
- $PDOP \cdot \sigma_0$ háromdimenziós középhiba
- $TDOP \cdot \sigma_0$ az időmeghatározás középhibája
- $HTDOP \cdot \sigma_0$ a vízszintes koordináták és az idő középhibája
- $GDOP \cdot \sigma_0$ a térbeli helyzet és idő középhibája.

Általánosan megfogalmazásban: a DOP az n-dimenziós hibaellipsoid tengelyeinek négyzetösszegéből vont négyzetgyök.

FELDOLGOZÁSI MÓDOK, MEGOLDÁSOK

HELYMEGHATÁROZÁSI PROBLÉMÁK

- Statikus és kinematikus meghatározás főbb jellemzői
- A megoldások rendszerezése

EGYSZERŰ PONTMEGHATÁROZÁS PSZEUDO TÁVOLSÁGOKBÓL

- Távolságmérés a műholdakra
- Legkisebb négyzetes megoldás

RELATIV HELYMEGHATÁROZÁS

- Pszeudo távolságmérésből
- Fázismérésből
- Fázismérések differenciájából

HÁLÓZATI MEGOLDÁSOK

- Pályajavítás és hálózatkiegyenlítés
- Súlyozott rövid pályaiű megoldás

KINEMATIKUS HELYMEGHATÁROZÁS

- Abszolút
- Relatív
- Kombinált

KIEGYENLÍTÉS KÉNYSZERFELTÉTELEKKEL

10.00 Feldolgozási módok, megoldások

A helymeghatározás történhet statikus vagy kinematikus módszerrel attól függően, hogy a vevőberendezés az észlelés folyamán stacionárisan működött vagy pedig valamilyen sebességgel mozgott. Elterjedés alatt van a félkinematikus módszer, amelynél a vevőberendezések felváltva egyhelyben állnak, majd pedig a következő álláspont felé indulnak úgy, hogy menet közben az észlelést nem szakítják meg.

A későbbiekben tárgyaljuk az egyszerű pontmeghatározást és a relatív helymeghatározást. Ez utóbbi a hálózatfejlesztéshez vezet.

A kinematikus helymeghatározás több változatban történhet: egy vevővel (egyszerű pontmeghatározás), több vevővel (relatív helymeghatározás), vagy pedig más mérésekkel, pl. inerciális navigációs rendszerrel kombinálható.

A STATIKUS ÉS KINEMATIKUS MEGHATÁROZÁS FŐ JELLEMZŐI

STATIKUS

- Egy, Kettő, vagy néhány pont
- Az eredményre nincs azonnal szükség
- Magas redundancia és megbízhatóság

KINEMATIKUS

- Egy mozgó pont
- Geocentrikus pozíció vagy
- Pozíció egy másik ponthoz képest
- Az eredmény azonnal szükséges
- Alacsony redundancia és pontosság
- A megbízhatóság növelésére
Kombináció és integráció
- Az eredmények javítása utólagos
adatsimítással

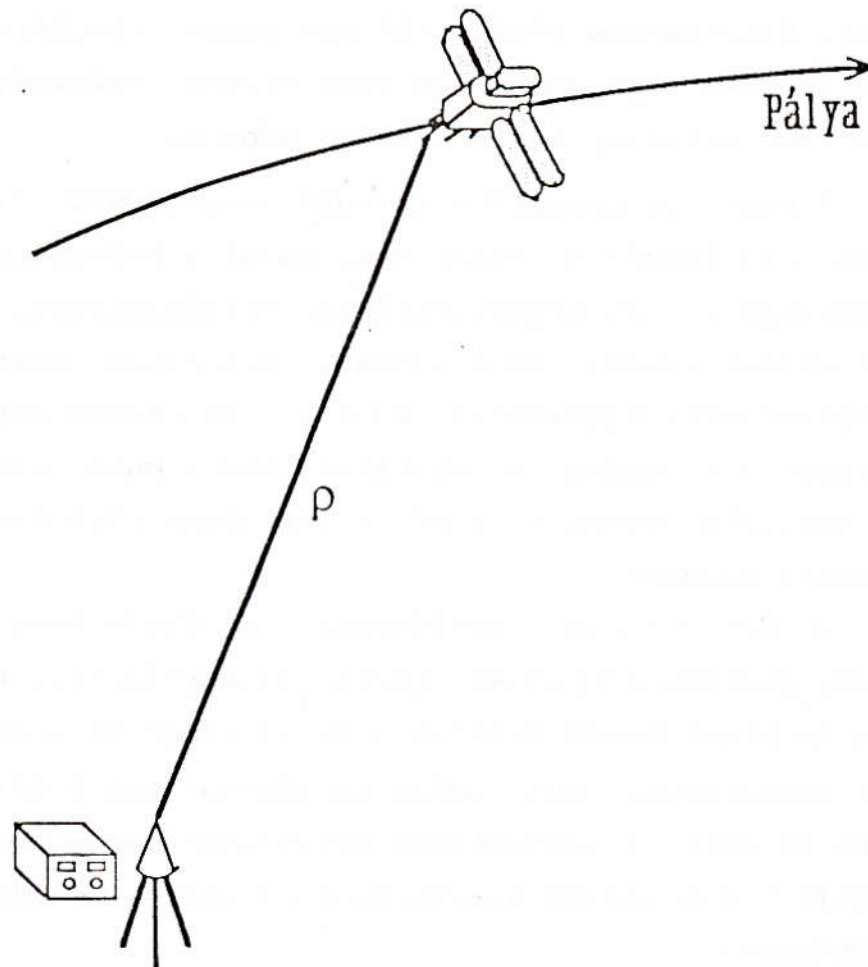
10.01 A statikus és kinematikus helymeghatározás fő jellemzői

A statikus feladatmegoldásnál egy vagy sok pont bevonása történik. Kinematikus módszernél egy mozgó vevőberendezés helyzetét tározzuk meg a geocentrikus rendszerben (abszolút helymeghatározás) vagy valamely másik ponthoz képest.

A statikus csoportba tartozó megoldások általában a mérés utáni feldolgozásban születnek, mivel a helyszínen nincs szükség a valósidejű pontos meghatározásra. Természetesen, a mérések egyszerűsített terepi feldolgozása általában megtörténik, hogy a mérőszemélyzet megbizonyosodjon az észlelések minőségéről. A főlős mérések nagy száma a statikus módszernél általában könnyedén biztosítható, ezért ez a mód a legvalószínűbb megoldás lehetőségét hordozza magában.

A kinematikus megoldásnál az észlelések száma általában kevés, gyakran csupán az egyértelmű megoldáshoz elegendő. A kinematikus megoldásnál általában valós idejű eredményre van szükség és a meghatározás pontossága is alacsonyabb a statikushoz képest. Ennek ellenére a kinematikus helymeghatározás pontossága növelhető relatív pozicionálás alkalmazásával vagy utófeldolgozással (adat-simítással).

EGYSZERŰ PONTMEGHATÁROZÁS PSZEUDO TÁVOLSÁGMÉRÉSEL



Megfigyelési egyenlet pszeudo távolság esetén

$$p = \rho + c(dt - dT) + d_{\text{ion}} + d_{\text{trop}}$$

Megfigyelési egyenlet fázismérés esetén

$$\Phi = \rho + c(dt - dT) + \lambda N - d_{\text{ion}} + d_{\text{trop}}$$

10.02 Egyszerű pontmeghatározás pszeudó távolságméréssel

A pszeudó távolságmérések segítségével történő egyszerű pontmeghatározás az alábbi, jól ismert GPS-féle megfigyelési egyenleten alapszik

$$p = \rho + c(dt-dT) + d_{ion} + d_{trop}$$

ahol a megfigyelt p távolság egyenlő az R földi pont vektor és az r szatellita vektor függvényeként kifejezett ρ távolsággal. Az ionoszférikus és a toposzférikus korrekciók a mért távolságban figyelembe veendő, feltételezve, hogy modelljük hibátlan. Az óraállásokból adódó $d(dt-dT)$ korreláció a vevő és a szatellita órájának a GPS időrendszerhez viszonyított állását fejezi ki. A megoldásból az egy pontos helymeghatározás esetén kihagyják mint olyan mennyiséget, amely zavaró lehet.

LEGKISEBB NÉGYZETES KIEGYENLÍTÉS EGYSZERŰ PONTMEGHATÁROZÁS ESETÉN

MODELL $\rho = f\{R, r, (dt - dT)\}$

LINEARIZÁLT
MODELL $v = (A_R \ A_T) \begin{bmatrix} dR \\ dT \end{bmatrix} + w$

nx1 nx4 4x1 4x1

NORMÁL
EGYENLETEK $N \begin{bmatrix} dR \\ dT \end{bmatrix} + u = 0$

$$N = (A_R \ A_T)^T C_P^{-1} (A_R \ A_T)$$

$$u = (A_R \ A_T)^T C_P^{-1} w$$

HEGOLDÁS $\begin{bmatrix} dR \\ dT \end{bmatrix} = - N^{-1} u$

A HEGOLDÁS
PONTOSSÁGA

$$C_{R,T} = N^{-1} = \begin{bmatrix} C_R & C_{RT} \\ C_{TR} & C_T \end{bmatrix}$$

$$C_R = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} \\ & & \sigma_z^2 \end{bmatrix}, \quad C_T = \sigma_T^2$$

10.03 Legkisebb négyzetes kiegyenlítés egyszerű pontmeghatározás esetén

A négy meghatározandó paraméterre (három koordináta és az idő) vonatkozó normálegyenletrendszer:

$$N \begin{bmatrix} dR \\ dT \end{bmatrix} + u = 0,$$

ahol

$$N = (A_R A_T)^T C_P^{-1} [A_R A_T],$$

és

$$u = (A_R A_T)^{-T} C_P^{-1} w.$$

A legkisebb négyzetes megoldás:

$$\begin{bmatrix} dR \\ dT \end{bmatrix} = -N^{-1} u$$

A pont három koordinátájára és az időre vonatkozó kovariancia:

$$C_{R,T} = N^{-1} = \begin{bmatrix} C_R & C_{RT} \\ C_{TR} & C_T \end{bmatrix}$$

$\begin{matrix} 3 \times 3 & 3 \times 1 \\ 1 \times 3 & 1 \times 1 \end{matrix}$

ahol C_{RT} és C_{TR} a keresztkovariancia mátrixok. A kérdéses mátrixok a következők:

$$C_R = \begin{bmatrix} \sigma_X^2 & \sigma_{XY} & \sigma_{XZ} \\ \sigma_{XY} & \sigma_Y^2 & \sigma_{YZ} \\ \sigma_{XZ} & \sigma_{YZ} & \sigma_Z^2 \end{bmatrix},$$

$\begin{matrix} 3 \times 3 \\ \text{szimmetrikus} \end{matrix}$

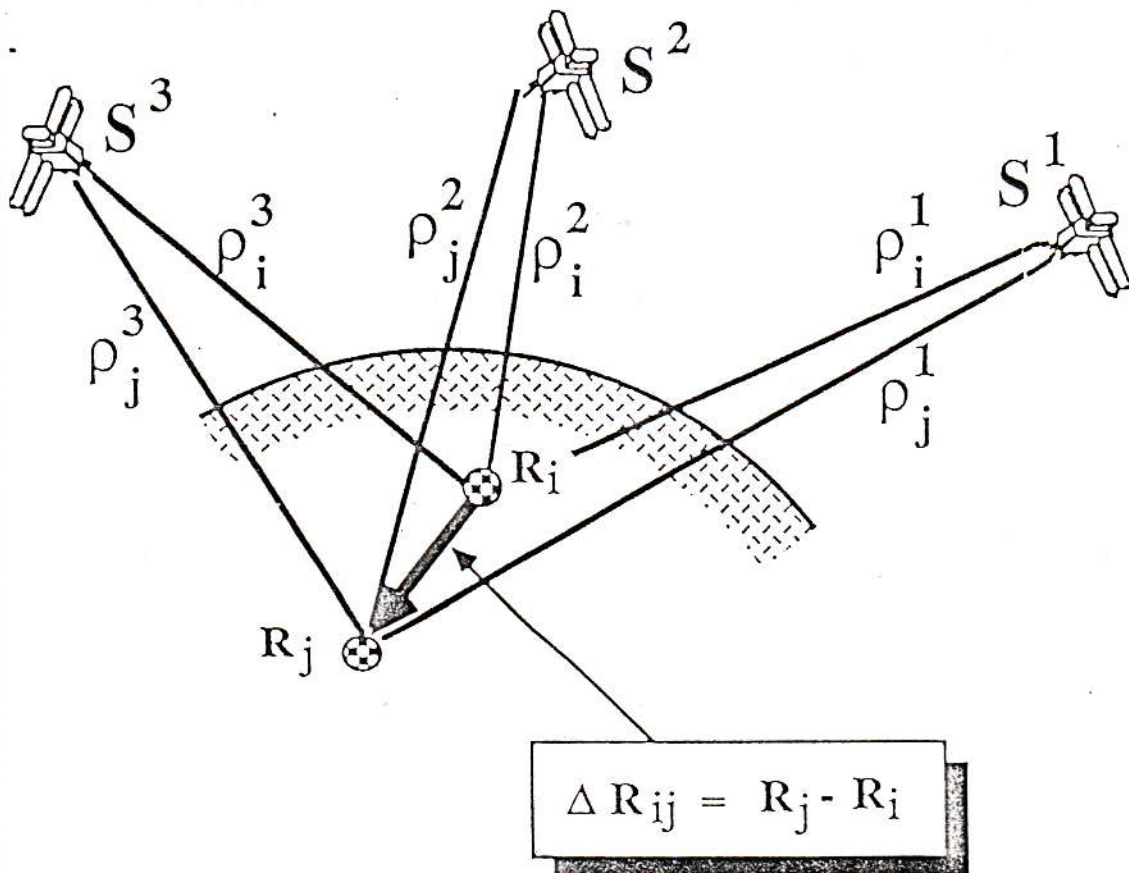
és

$$C_T = \sigma_T^2,$$

$\begin{matrix} 1 \times 1 \end{matrix}$

Mindez a négy ismeretlen varianciáját adja. A varianciák megadják a geometriai hibahatást.

RELATIV HELYMEGHATÁROZÁS PSZEUDO TÁVOLSÁGMÉRÉSEKBŐL



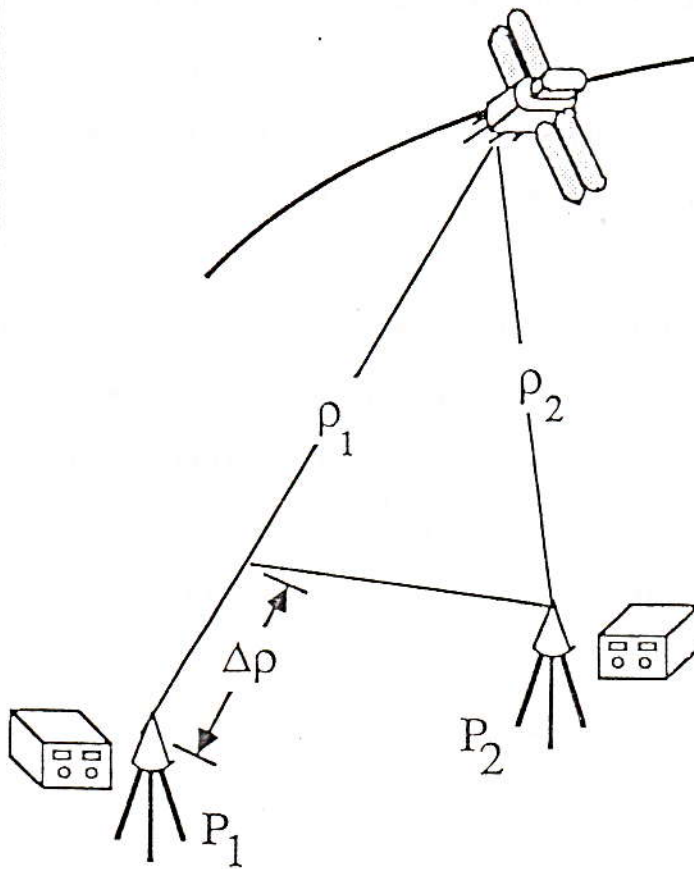
A ΔR_{ij} típusú relatív helyzeteket sokkal pontosabban tudjuk meghatározni, mint az R_i és R_j vektorokat külön-külön, mivel több olyan hibaforrás van, melyek az együttes mérés esetén kiesnek.

10.04 Relatív helymeghatározás pszeudó távolságmérésekből

Egy ΔR_{ij} bázisvonal vektor $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ komponenseinek meghatározási feladata a relatív helymeghatározás. Két (vagy több) vevő észleli a NAVSTAR GPS holdakat szimultán. A vevők méréseiben néhány hibaforrás közös (vagy hasonló). A ΔR_{ij} -re történő megoldásnál ezek a hibák kiesnek.

A δR_{ij} úgy is meghatározható persze, hogy külön-külön meghatározzuk az R_i és R_j vektorokat pl. pszeudó távolságméréssel és utána képezzük azok különbségét. Célszerű emlékeztetni, hogy szimultán mérésekre van szükség azért, hogy mind a két állomás számára közös hibák kiessenek a két megoldás különbségének a képzésekor.

RELATIV HELYMEGHATÁROZÁS FÁZISMÉRÉSEKBŐL



$$\Delta dt \doteq 0$$

(ugyanaz a műhold
órájának hibája
a két észlelésben)

$$\Delta d\rho \doteq 0$$

(a pályahiba
közel azonos a
két állomás
észleléseiben)

Megfigyelési egyenletek:

$$\Delta p = \Delta\rho - c\Delta dT + \Delta d_{\text{ion}} + \Delta d_{\text{trop}} \quad (\text{kód})$$

$$\Delta\Phi = \Delta\rho - c\Delta dT - \Delta d_{\text{ion}} + \Delta d_{\text{trop}} + \Delta N \quad (\text{fázis})$$

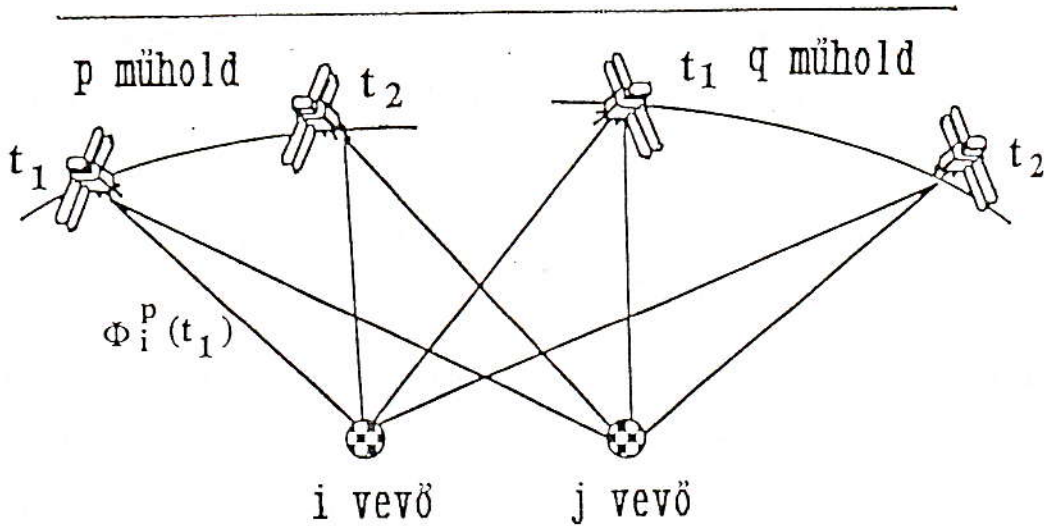
10.05 Relatív helymeghatározás fázismérésekből

Egy másik pontosabb út a relatív helymeghatározás megvalósítására a fázismérések (vagy a kódérések) egyszerű differenciájának alkalmazása. Mivel a fázismérések pontosabbak, mint a kódérések, ezért az előbbire vonatkozó modellt adjuk meg:

$$\Delta\phi = f(\Delta R, \tau, \Delta dT, \Delta N),$$

amelyben két, tulajdonképpen fölösleges paraméter határozandó meg. A ΔdT relatív vevő óra állandó megmarad, mivel a dt szatellita óra állandó kiesik. Az efemeridák és a légkör hibája majdnem azonos a két vevőnél, ezért a különbségképzésnél a hatásuk nagy mértékben csökken. Ugyanakkor szerepel a ΔN ciklus többértelműség. Fázisméréssel történő relatív helymeghatározásnál öt paraméter határozandó meg: három koordináta, egy idő és egy többértelműségi adat.

A GPS FÁZISMÉRÉSEK DIFFERENCIÁI



Pillanatnyi	(Egyszerű) különbség vevő (Δ)	(Kettős) különbség műhold (∇)	(Hármas) különbség idő (δ)
$\Phi_i^p(t_1)$	$\Delta \Phi^p(t_1)$		
$\Phi_j^p(t_1)$		$\nabla \Delta \Phi(t_1)$	
$\Phi_i^q(t_1)$	$\Delta \Phi^q(t_1)$		
$\Phi_j^q(t_1)$			
$\Phi_i^p(t_2)$	$\Delta \Phi^p(t_2)$		$\delta \nabla \Delta \Phi$
$\Phi_j^p(t_2)$		$\nabla \Delta \Phi(t_2)$	
$\Phi_i^q(t_2)$	$\Delta \Phi^q(t_2)$		
$\Phi_j^q(t_2)$			

10.06 GPS fázismérések differenciái

Ez a módszer a ciklus többértelműségből adódó paraméter kiejtését szolgálja, miáltal a relatív helymeghatározási feladatban csupán bázisvektor és az időparaméter a kiegyenlítendő mennyiségek. Ez úgy érhető el, hogy további két differencia képzés történik a vevők között (Δ), nevezetesen a szatellita-közti (∇) és epochaközi (δ) különbségek.

E sorban a következő az u.n. kettős differencia képzés modellje:

$$\nabla\Delta\phi = f(\Delta R, r, \Delta N)$$

Észrevehető, hogy a relatív óraállás állandó kiesett.

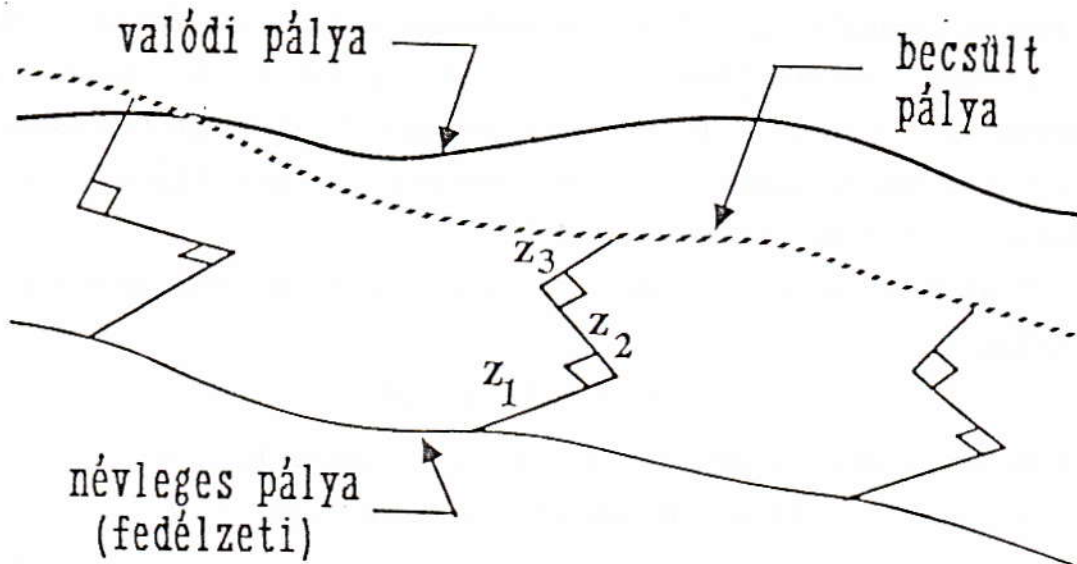
A végső modell a hármas differencia képzés:

$$\delta\nabla\Delta\phi = f(\Delta R, r).$$

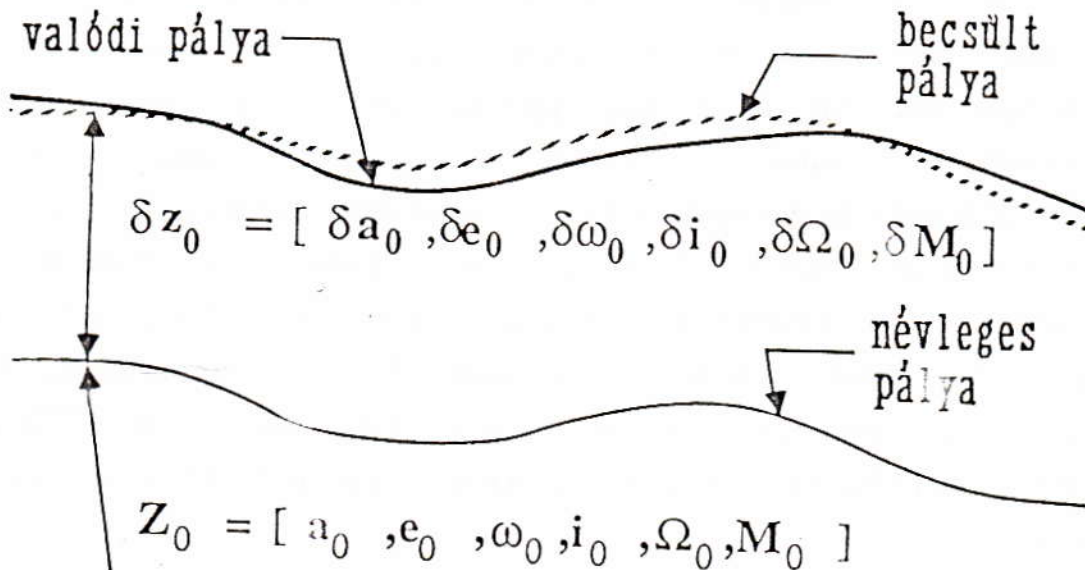
Itt a ciklus többértelműség paraméter is kiesett.

A segédadatok meghatározásának kiküszöböléséért árat fizetünk. A kovariancia mátrix a hármas differencia képzésnél nem-diagonális, elemeinek számítását pedig Remondi adta meg 1985-ben. Ide kapcsolódó megjegyzés, hogy amikor csak diagonális mátrixot használunk a megoldáshoz, akkor a megoldás nem alakul kedvezőtlenül. Egy másik hátránya a hármas differencia képzésnek, hogy nem használható ki a többértelműségi paraméterek integer jellege által képviselt előny. Egyes esetekben, pl. változó légköri körülményeket könnyen produkáló hosszú bázisvonalak esetében, az integer érték kényszere sem lehetséges. A hármas differencia képzés előnye, hogy a ciklus ugrások könnyen azonosíthatók.

HÁLÓZAT MEGOLDÁS ÉS PÁLYAJAVÍTÁS



EGYSZERŰSÍTETT RÖVID-PÁLYAIVÜ MÓDSZER



RÖVID-PÁLYAIVÜ MÓDSZER

10.07 Hálózat megoldás és pályajavítás

A GPS mérésekből generált hálózati megoldások egyik előnye, hogy a kiegyenlítési modell kiterjeszhető pályaelemek javítására akkor, ha a hálózat kiterjedése a földön elég nagy, legalább regionális.

A 100 km-nél nagyobb kiterjedésnél már beszélhetünk regionális hálózatról, 1000-2000 km-nél pedig kontinentálisról. Ilyen hálózati kiterjedésnél nemcsak lehetőség adódik a rövid pályáivű kiegyenlítési technika alkalmazására, hanem az szükségessé is válik.

Két megközelítés lehetséges: az állandó pályahibák meghatározása (ezt gyakran egyszerű rövidpályáivű módszernek hívjuk) vagy a rövidpályáivű kiegyenlítési technika. E két megközelítésnél a matematikai modell a következő (a közvetítő egyenletek implicit formában):

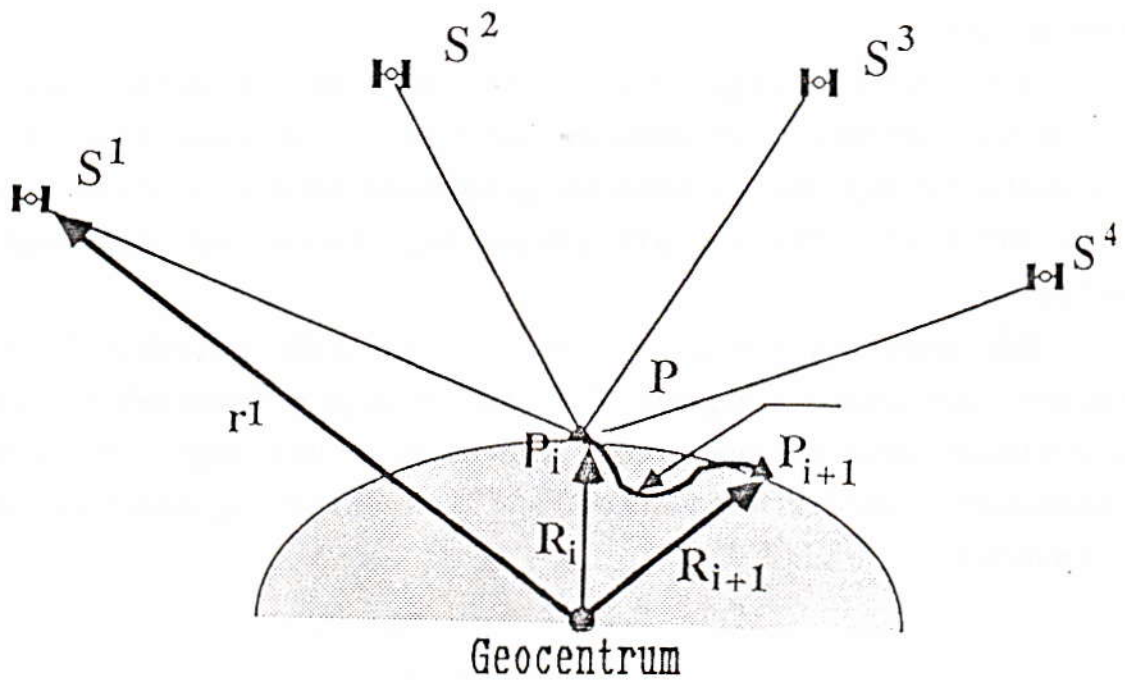
$$f_1(R, r, b, l) = 0, C_1, C_b$$

$$f_2(r, z) = 0, C_z$$

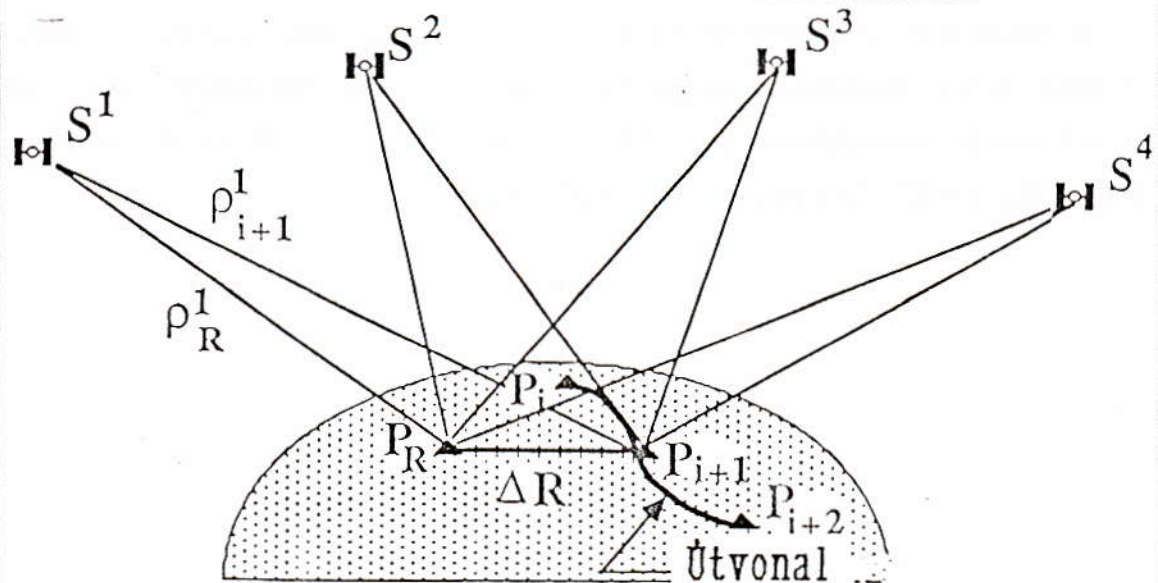
Az első modellben a vevő R koordinátái, a szatellita r pozíciója és bizonyos b állandó hiba (pl. óra) és a megfigyelési vektor (ez utóbbi lehet távolság vagy fázismérés). A második egyenlet pályaelemekre vonatkozó feltételi egyenlet (z - Kepler pályaelemek). A C_1 , C_b és C_z kovariancia mátrixok.

A KINEMATIKUS HELY- MEGHATÁROZÁS ELVE

ABSZOLUT KINEMATIKUS HELYMEGHATÁROZÁS



RELATIV KINEMATIKUS HELYMEGHATÁROZÁS



10.08 A kinematikus helymeghatározás elve

A kinematikus helymeghatározás azokat az alkalmazásokat jelenti, amelyeknél valamely mozgó objektum útvonalát határozzák meg. Ilyen lehet a GPS vevővel felszerelt jármű, hajó, repülőgép. A lassan mozgó objektumok (pl. gleccserek, tektonikai mozgások) nem tartoznak ebbe a tárgykörbe. A kinematikus pozicionálás a navigálással cseng össze azzal a kitétellel, hogy az elsődleges helymeghatározás, a másodikként a sebességmeghatározás és mozgásirányítás az elsődleges cél. Egy másik különbség, hogy navigálásnál valós idejű meghatározások szükségesek, míg a kinematikus pozicionálásnál utófeldolgozások is alkalmazásra kerülnek. Mindezt a felhasználás szempontjából kell tudnunk.

Ha a kinematikus helymeghatározás pl. egy konvencionális koordinátarendszerben történik, akkor abszolút kinematikus pozicionálásról beszélünk. Alternatívaként használják még a kinematikus egyszerű pontmeghatározás kifejezést. Ha a helymeghatározás egy vagy több ismert helyzetű ponthoz képest történik, akkor a mozgó objektum helyének meghatározása relatív kinematikus pozicionálás. Alternatívaként használják a differenciális kinematikus pozicionálás kifejezést. A valós idejű relatív kinematikus helymeghatározásnál rádiókapcsolat biztosítása szükséges a stacionáris és a mozgó objektum között.

Az észlelések egyidejűsége miatt és ebből eredő szatellita hibakiesések következtében a relatív pozicionálás pontosabb mint az abszolút.

Az abszolút és a relatív helymeghatározáshoz egyaránt használhatunk pszeudó-távolságméréseket, fázisméréseket és ezek kombinációit. Ezek a GPS észlelések a helymeghatározás céljából más mérések (rendszerek, szatelliták stb.) halmazával együtt egy kiegyenlítési modellben is eredményesen alkalmazhatók.

11. GYAKORLATI SZEMPONTOK

TEREPI MŰVELETEK

A TEREPRE ÉRKEZÉS ELŐTT

- Vevő szinkronizálás (ha szükséges)

ÚTBAN A PONT FELÉ

- A műszert bekapcsolva tartani

FELÁLLÁS

- Antenna felállítás, fáziscentrum mérés
- Vevő beindítás, hold válogatás (ha szüks.)
- Az adatrögzítés biztosítása
- Kalibrálások elvégzése

ÉSZLELÉS ALATT

- Ellenőrizni a vevő működését
- Meteorológiai adatok biztosítása
- Észlelési napló vezetése
 - időjárási körülmények
 - vevő problémák
 - kezelési hibák

AZ ÉSZLELÉS BEFEJEZÉSE

- Adatok átvitele feldolgozáshoz
- Kalibrálás megismétlése
- Indulás a következő pontra

11.01 Terepi műveletek

A gyakorlati alkalmazásnál figyelembe veendő szempontok erősen függenek a vevők típusától. Jelenleg a vevőfejlesztés, miként maga a GPS technika is, a felfuttatás időszakában van, ezért a műszertípusok palettája sokszínű. Kódnélküli vevők esetén a mérés előtt a vevőket szinkronizálni kell. Mivel az oszcillátorok megbízható működéséhez idő szükséges, a mérés előtt néhány órával be kell kapcsolni (korszerűbb műszereknél néhány perc is elegendő).

A pontra fel kell állítani az antennát és megmérni a fáziscentrum központosságát (gyakran csak a magassági értéket).

Kiválasztjuk a kedvező holdakat annak biztosítására, hogy a vevők azonos holdakat észleljenek (általában - főleg a geodéziában-több vevővel dolgoznak). Megjegyezzük, hogy a korszerű vevők már 8-12 hold egyidejű vételére is képesek, ezért a válogatás nem szükséges. Ellenőrizni kell, hogy a mérési adatok és a fedélzeti pályaadatok rögzítése rendben történik-e. Figyelni kell a jelek minőségét. (Előfordulhat olyan hely, ahol külső zajok miatt nem lehet zavartalanul észlelni.)

Gondoskodni kell a meteorológiai adatok folyamatos biztosításáról. (Némely vevőtípus magában foglalja ezt a műszeregységet és automatikusan rögzíti a szükséges adatokat.)

Az észlelési napló vezetése a későbbi feldolgozás számára jelenthet igen hasznos információt, ezért a mérés körülményeit precízen kell vezetni. Ha a szükséges észlelési adatmennyiség összegyűlt, akkor ellenőrizzük a fáziscentrum magasságát, összecsomagolunk, és tovább megyünk egy másik pontra.

ADATFELDOLGOZÁS

A TEREPEEN

- Adatellenőrzés

ELŐFELDOLGOZÁS

- Adatrendezés
- Ciklus ugrások kezelése
- Többértelműség feloldása
- Pályaadatok biztosítása

KIEGYENLÍTÉS

- Bázisvonal meghatározás
- Háromdimenziós hálózatkiegyenlítés

UTÓMUNKÁLATOK

- Adatok analizálása
 - ismétlés
 - megbízhatóság
- Archiválás

11.02 Adatfeldolgozás

Az első lépés az észlelési adatok átvitele a további felhasználás számára alkalmas adathordozóra (általában diszkettre). A fejlődés iránya a terepen végzett mikroszámítógépes feldolgozás, hogy adott esetben azonnal eldönthető legyen a további észlelések (pótmérések) végzése.

Az előfeldolgozás során elvégezzük az adatok rendezését a további feldolgozás függvényében (szimpla, dupla esetleg tripla differenciák képzése).

Dekódolni kell a fedélzeti pályaadatokat. Ha pontosabb pályával kívánunk dolgozni, akkor be kell azt szereznünk valamelyik pályakövető szervezettől. Ezek a pályák vagy a kért intervallumra vonatkozó megfelelő sűrűségű műhold koordináták, vagy a pályáivra fektetett simítógörbével megadott függvények együtthatóinak formájában adóttak.

Számítani kell az antenna vízszintes és magassági külpontosságát, valamint a meteorológiai adatokat.

A feldolgozás módja, a szoftver kiválasztása függ a meghatározás pontosságától. Egyszerűbb szoftverrel dolgozhatunk, ha csupán bázisvonal meghatározása a cél, és nem egy teljes hálózat kiegyenlítése.

A kapott eredményeket elemeznünk kell, hogy a kapott belső hibák megfelelnek-e, ill. hogy az ismételt meghatározások összhangban vannak-e.

Végül az eredményeket szöveggel látjuk el, kilistázzuk és rögzítjük valamilyen adathordozón.

AZ ADATFELDOLGOZÁS SZEMPONTJAI

A SZOFTVER ELLENŐRZÉSE

- Egységes adatrendszer

A BEMENŐ ADATOK OPCIOI

- A minimális magassági szög értéke
- Az antenna külpontossága

ADATKEZELÉSI SZEMPONTOK

- pályaadatok forrása és pontossága
- A mérések sűrítésének kritériumai
- A szűrés maximális mértéke

UTÓFELDOLGOZÁSI SZEMPONTOK

- Ismételt meghatározások összehasonlítása
- A kiegyenlített eredmények vizsgálata
- Koordináta transzformációk

11.03 Az adatok feldolgozásának szempontjai

A rendelkezésre álló feldolgozó szoftvert a használatba vétel előtt szükséges ellenőrizni, egy a forgalomban lévő GPS egységes adatkészlet feldolgozásával. A tesztelésnek ki kell terjednie az egyes opciókra, a megoldásoknak hibahatáron belül egyezniük kell a már elfogadott szoftverek által adott eredményekkel.

A feldolgozásnál ügyelni kell az alábbi pontosságot befolyásoló tényezőkre:

- az antenna fáziscentrumának külpontossága
- az észlelések minimális magassági szöge
- a pályaadatok forrása és kora
- a mérési adatok mennyisége és minősége
- az adatok szűrésének kritériumai
- a kiegyenlítés opciói

Ezután történik a vektorok (bázisvonalak) számítása. Minden többször megmért bázisvonalra számíthatunk egymástól független értékeket, amelyeknek a megadott hibahatáron belül egyezniük kell. A pontossági kritérium függ a vektor hosszától.

A háromdimenziós kiegyenlítés megadja a vektorok hibáit és választ ad arra, hogy reálisak voltak-e a súlyozás arányai.

A kiegyenlítés következtében lehetőségünk van arra, hogy kapcsolattal teremtsünk a GPS holdak és a földi hálózat koordinátarendszerei között méretarány, tájékozás, és geoid unduláció tekintetében. A GPS hálózat pontossága elegendő a vizsgálatok elvégzéséhez.

12.00

A GPS JELLEMZŐINEK JELENE ÉS JÖVŐJE

	1986	1990	IDEÁLIS
ÁR	20-300k\$	5-30k\$	100\$
SÚLY	50-300kg	5-15kg	Karóra
ÁRAM- FELVÉTEL	400-800W	5-10W	óra akku.
ÉSZLELÉSI IDŐ	1-2 óra	30 perc	millisec
REAL TIME	nem	is	igen
PONTOSSÁG	1 ppm 5 cm	0.01 ppm 1 cm	1 mm
		?	??

12.00 A GPS jellemzőinek jelene és jövője

A GPS potenciális felhasználóit élénken foglalkoztatják az olyan kérdések mint:

- hogyan alakul a GPS vevők - ára
 - súlya, mérete
 - áramfelvétele
- észlelési idő.

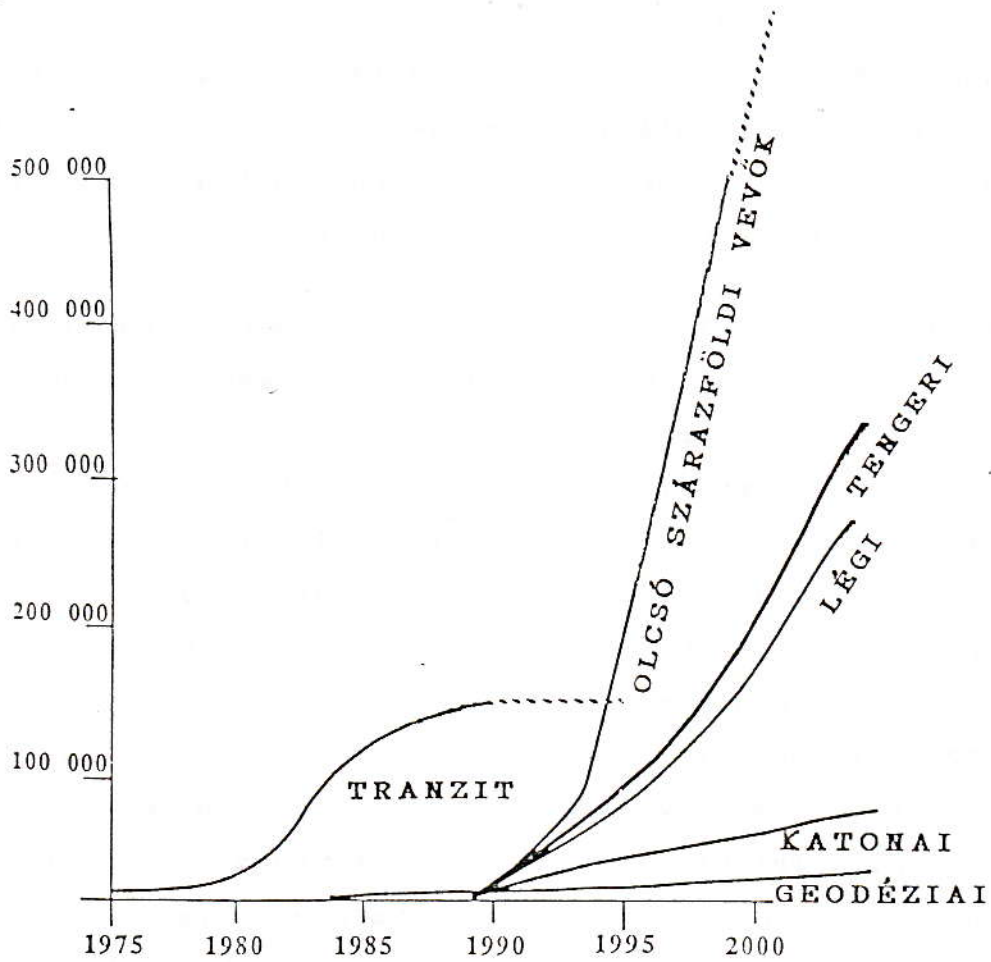
Válasszuk 1986-ot vizsgálatunk első időpontjaként, amikor már értékes tapasztalatok álltak rendelkezésre. A másik dátum 1990, amikortól a rendszert csaknem üzemszerűen lehet használni (eredetileg ez volt a teljes kiépítés tervezett dátuma, de az két évvel eltolódott).

Végül időpont nélkül feltüntettünk egy álom-vevő jellemzőit is, amelynek azonban van realitása az elkövetkező évtizedekben.

Néhány fejlesztési irányzat:

- Több cég fejleszt olyan speciális GPS chip-et (VLSI chip), amely rendkívüli módon fogja csökkenteni az alkatrészek számát.
- Az amerikai Hadügyminisztérium fejlesztése alatt áll egy igen kisméretű vevőtípus katonai célokra, de annak nyilván kihatása lesz a polgári fejlesztésekre is.
- Az eredeti katonai igény, miszerint elegendő négy holdat észlelni egyszerre, nem helytálló. Már a jelenleg legkorszerűbb vevők is (Ashtech XII, Trimble ST), 8-12 holdat tudnak észlelni egyidőben.
- Várható a P kód szélesebb körű alkalmazása is.
- Jelentős állomása lesz a GPS technikának, ha sikerül megoldani a valósidejű (real-time) relatív helymeghatározást.

A FELHASZNÁLÓK SZÁMÁNAK ALAKULÁSA



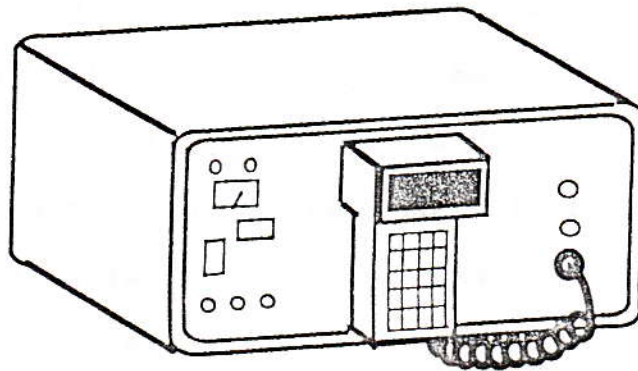
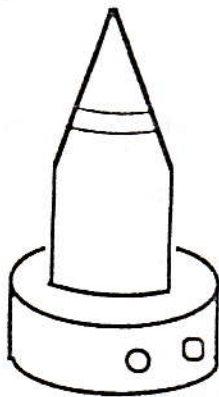
12.01 A felhasználók számának alakulása

Az ábrán feltüntettük a Tranzit rendszer felhasználóinak görbét is, amely alapján könnyebb megbecsülni a potenciális GPS felhasználók számát. Bár mindkettő alapjában katonai rendszer, közel sem a katonák a legnagyobb felhasználók. Erre a célra a Tranzit vevőkből mindössze 1000 darabot vásároltak és csupán 20-30 000-re becsülhető a GPS vevők felhasználása is.

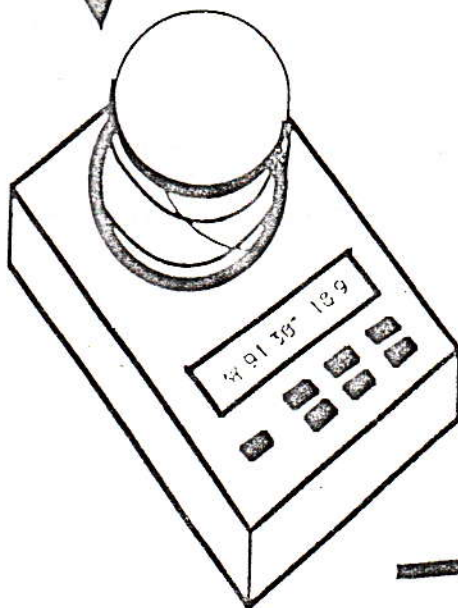
A Tranzit rendszer polgári felhasználóinak száma ugyanakkor közel 150 000. Különösen elterjedtek az olcsó egyfrekvenciás vevők, halászhajók, jachtok navigálására. A geodéziai alkalmazás köre igen szűk, mindössze 1000 vevő. A GPS esetében, annak előnyei miatt, ennek kb. a tízszerese várható.

A várható legnagyobb üzlet a szárazföldi járművek navigálásával kapcsolatos. Az autókba szerelhető GPS vevők iránt igen nagy lesz a kereslet.

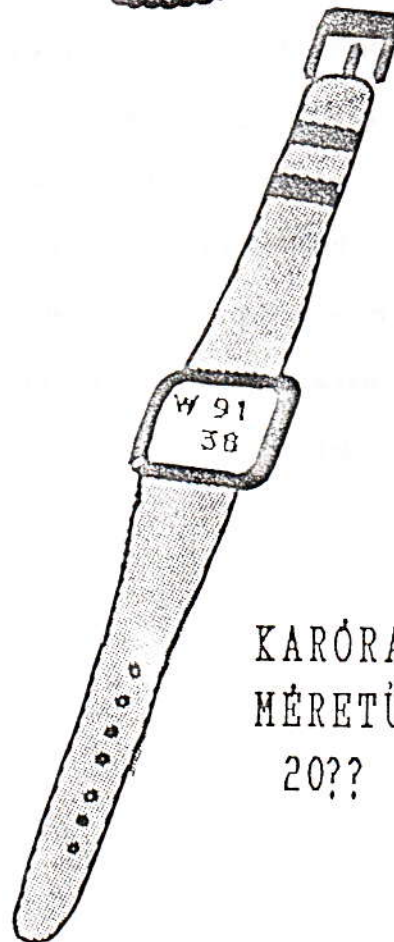
A HELYMEGHATÁROZÁS JÖVŐJE



TI-4100
1982



KÉZI VEVŐK
90-ES ÉVEK



KARÓRA
MÉRETŰ
20??

12.02 A helymeghatározás jövője

A GPS-szel beköszönt az a korszak, amikor egész évben, a nap 24 órájában lehetőségünk lesz a pontos helymeghatározásra az egész földfelszínen.

A GPS forradalmasítja a helymeghatározást, amely nem csak katonai, vagy geodéziai területeken, de elsősorban a mindennapi életünkben fog jelentkezni. Természetesen ebbe nem csupán a NAVSTAR fog szerepet játszani, hanem beleértjük a GLONASS, Geostar stb. rendszereket is.

A közeljövőben a helymeghatározás egyszerű, gyors és olcsó lesz a könnyen kezelhető kisméretű vevők felhasználásával.

A már fejlesztés alatt álló kézi vevő nem lesz sokkal nagyobb mint egy játékkártya csomag (természetesen nem geodéziai igények kielégítésére).

A fejlődés eredményezni fogja a még kisebb és pontosabb vevők kifejlesztését. Nem lehetetlen a karórába épített olcsó vevők megjelenése sem.

Hogy milyen hatással lesz a globális pozicionálás a mindennapi életünkre, ma még lehetetlen pontosan előre jelezni. Az máris valószínű, hogy a szárazföldi járművek automatikus navigálásában (a városok úthálózatával kombinálva) alapvető szerepet fog játszani.

13.00 GPS TERMINOLÓGIA

Angol nyelvű kifejezések	Javasolt magyar megfelelők
Ambiguity	többértelműség
Bandwidth	Sávszélesség
Baseline	bázisvonal
Beat frequency	lekevert frekvencia
Between-epoch difference	epocha-közti különbség
Between-frequency difference	frekvencia-közti különbség
Between-receiver difference	vevő-közti különbség
Between-satellite difference	szatellita-közti különbség
Binary pulse code modulation	bináris impulzuskód moduláció
Binary biphase modulation	fázis billentyűzés
Carrier	vivő/hordozóhullám
Carrier frequency	vivő/hordozófrekvencia
Carrier beat phase	vivő/hordozófázis
Carrier beat phase ambiguity	vivőfázis többértelműség
Channel	csatorna
Chip	csip
Cycle slip	ciklus ugrás
C/A-code	c/A kód
Complete instantaneous phase measurement	teljes fázismérés
Correlation-type channel	korrelációs csatorna
Delay lock	kód illesztés
Delta pseudorange	pszeudo távolságok különbsége
Differenced measurements	fáziskülönbség mérések
Differential positioning	relatív helymeghatározás
Dilution of precision (DOP)	a geometria hibahatása (DOP)
Doppler shift	Dopplercsúszás
Dynamic positioning	dinamikai helymeghatározás

Fast switching channel	gyorskapcsolású csatorna
Fractional instantaneous phase measurement	fázis törtrészének mérése
Frequency band	frekvencia sáv
Frequency spectrum	frekvencia spektrum
Handover word	időszinkron kódszó
Independent baselines	független bázisvonal
Independent observing sessions	független mérési/észlelési sorozat
Ionospheric refraction	ionoszférikus refrakció
Interferometry	interferometria
Kinematic positioning	kinematikus helymeghatározás
Lane	zérus fáziskülönbségek izofelületei
L-band	L-sáv
Multipath error	többutas terjedési hiba
Multichannel receiver	többcsatornás vevő
Multiplexing channel	multiplex csatorna
Observing session	mérési/észlelési sorozat
Outage	hibahatár túllépés
Phase lock	fáziscsatolás
Phase observable	fázismérés
P-code	P-kód
Precise positioning service (PPS)	szabatos helymeghatározási szolgáltatás
Pseudorandom noise (PRN) code	álvéletlen zajú kód
Pseudorange	pszeudo távolság
Pseudorange difference	pszeudo távolság különbség
Receiver channel	vevő csatorna
Reconstructed carrier phase	rekonstruált vivőfázis
Relative positioning	relatív helymeghatározás
Restart capability	újraindíthatóság
S-code	S-kód
Satellite constellation	műhold konstelláció
Satellite configuration	műhold konfiguráció

Simultaneous measurements	egyidejű mérések
Slow switching channel	lassú kapcsolású csatorna
Squaring-type channel	négyzetelő csatorna
Standard positioning service (SPS)	állandó követési szolgálat
Standby	készenléti állapot
Static positioning	statikus helymeghatározás
Switching channel	kapcsoló csatorna
Translocation	transzlokáció

I R O D A L O M

1. D.E. Wells: Guide to GPS positioning
Canadian GPS associates, New Brunswick 1986.
2. Mihály Sz.: A GPS a geodéziai gyakorlatban.
Geodézia és Kartográfia 1988/2.
3. R. Scherrer: The WM GPS primer. E.M.R. Research & Development
(Surveys & Mapping) Ottawa.
4. R.W. King, E.G Masters, C.Rizos, A Stolz, J.Collins:
Surveying with GPS. Monograph No.9,
Kensington NSW Austrália, 1985.
5. K.D. McDonald: GPS Receivers Trend in Technology, Equipment
and Performance. Federal Aviation Administra-
tion, Washington D.C. 1988.

