

# A műholdas helymeghatározás elve, és gyakorlati alkalmazása

---

## 1. GPS a helymeghatározás legkorszerűbb eszköze

### 2. A GPS mérés elve

### 3. A jelfeldolgozás alapelvei

### 4. Helymeghatározási módszerek

### 5. Milyen pontos a GPS ?

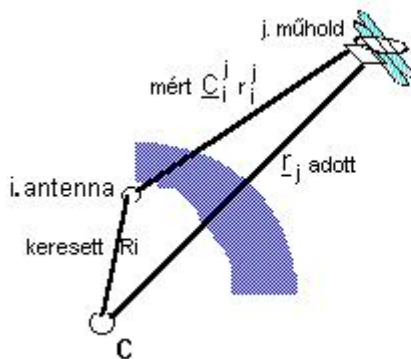
---

## 1. GPS A HELYMEGHATÁROZÁS LEGKORSZERŰBB ESZKÖZE

A földrajzi helymeghatározás többezer éves története során az elmúlt 35 év fejlesztései eredményezték a legnagyobb változást mind a módszerek, mind a lehetőségek tekintetében.

A hagyományos, földi pontról földi pontra történő mérések mellett megjelentek az űrtechnika melléktermékei, a kozmikus és szatellita módszerek.

A mesterséges holdról történő helymeghatározás elvét mutatja az alábbi ábra.



$$R_i = r_i^j - c_i^j r_i^j$$

$R_i$  az  $i$ -ik antenna helyvektora

$r_i^j$  a  $j$ -ik műhold helyvektora

$c_i^j r_i^j$  a két helyvektor közötti távolság

Az  $i$ . állásponton működő vevőkészülék méri a műhold pillanatnyi távolságát és irányát, vagyis az  $r$  irányvektort. Amennyiben ismerjük a műhold koordinátáit, a vevő koordinátái ugyanabban a koordinátarendszerben számíthatók. Mivel a szatellitamódszerek közül pillanatnyilag egyik sem képes az  $r$  irányvektor mindhárom komponensét egyidőben szolgáltatni, ezért ha távolságmérést alkalmazunk, a vevőnek egyidőben 3 ismert koordinátájú műhold távolságát kell mérni. A GPS módszer esetében ez 4 műhold egyidejű mérését jelenti, mivel negyedik ismeretlenként kezeljük a vevőnk órájának eltérését a GPS rendszeridőtől.

A mesterséges holdak koordinátái tetszőleges időpontra számíthatók a hold által sugárzott jelek kódolt paramétereiből. Ezek a koordináták geocentrikus, derékszögű X, Y, Z koordináták, melyek a WGS 84 referencia rendszerre vonatkoznak. A GPS mérések eredményeként elsődleges adatként WGS 84

rendszerben értelmezett geocentrikus, derékszögű X, Y, Z koordinátákat kapunk. Ezekből, - a megfelelő transzformációs paramétereket ismerve - tetszőleges dátumra, alaprendszerre vonatkoztatott koordinátákat számíthatunk.

---

## 2. A GPS MÉRÉS ELVE

**A GPS technika a mesterséges holdak által kisugárzott rádiójelek vételén alapul.**

**A GPS holdak fedélzetén elhelyezett oszcillátorok**  $f_0 = 10.23$  MHz alappfrekvencián működnek, rádiójeleket azonban két különböző frekvencián sugároznak. Az **L1** és **L2** jelűn. Az L1 frekvencia az alappfrekvencia 154 -szerese, az L2 120 - szorosa.

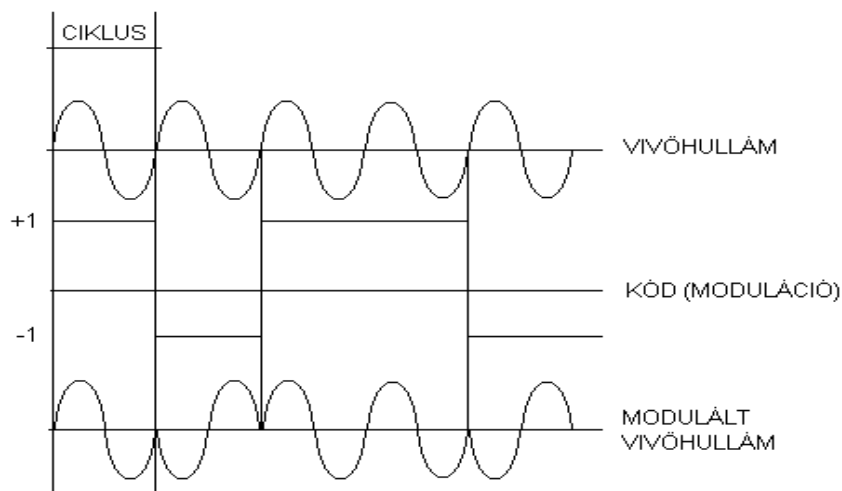
$$L_{1f} f_1 = 154 f_0 = 1575.42 \text{ MHz.}$$

$$L_{2f} f_2 = 120 f_0 = 1227.60 \text{ MHz.}$$

Ennek megfelelően a hullámhosszak:  $l_1 = 19.0$  cm és  $l_2 = 24.4$  cm. Ezeket a vivőhullámokat (*carrier*) különböző kódokkal modulálják annak érdekében, hogy információkat továbbíthassanak a vevők felé. A kódok +1 és -1 értékekből álló sorozatok, a kettes számrendszerbeli 0 és 1 számjegyeknek megfelelően.

A kódolás elve a fázis billentyűzés (*biphase modulation*), azaz a vivőhullám fázisának 180 fokkal való eltolása akkor, ha a kód értéke (+1 vagy -1) változik.

A fázisbillentyűzés elvét az alábbi ábra szemlélteti.



A vivőhullám modulálásakor kétféle kódolást alkalmaznak. A **C/A kód (coarse/acquisition code) frekvenciája**  $f_0/10$ , azaz 1.023 MHz - es frekvenciával követik egymást a +1 és -1 értékek. A kódsorozat minden ezredmásodpercben ismétlődik, és minden GPS hold esetén különböző. Ez teszi egyértelműen azonosíthatóvá a holdakat.

A **P - kód (precision code)** frekvenciája megegyezik az  $f_0$  alappfrekvenciával, és 266.4 naponta ismétlődik. A holdak azonosítását itt az teszi lehetővé, hogy a kód "mintája" minden hold esetében egyedi. A P - kód teljes, 266.4 napos ciklusának 7-7 napos darabját rendelték hozzá egy GPS holdhoz. A kód generálása minden vasárnap éjjélkor, a GPS hét kezdetén újra indul. A mesterséges holdakat azonosító PRN (*pseudorandom noise*) szám éppen arra utal, hogy a teljes P - kód melyik egyhetes szakaszát rendelték a holdhoz.

Néhány éve új fogalom került a köztudatba, ez az *Anti-Spoofing* ( A - S). Az Anti Spoofing a P kód titkosítása annak elkerülése céljából, hogy valaki hamis információ sugárzásával illetéktelenül beavatkozhasson a rendszerbe. A titkosítás eredménye az Y kód, melyet csak a titkos konverziós algoritmus ismeretében lehet megfejteni.

---

### 3. A JELFELDOLGOZÁS ALAPELVEI

Eddig a GPS holdak jelsugárzásának módjairól beszéltünk. A felhasználó számára legalább ilyen fontos kérdés, hogy hogyan juthat hozzá a jelek által hordozott információhoz, azaz hogyan működik a GPS vevő.

A GPS két típusú mérést képes végezni. Az egyik az úgynevezett kód korrelációs technika, amely megkívánja legalább az egyik PRN kód ismeretét, a másik a kód nélküli technika. Minkét eljárás alkalmas a vivőhullám rekonstruálására, így annak fázisa meghatározható.

A kód **korrelációs technika** a modulálatlan vivőhullám mellett a jel többi komponensét ( navigációs üzenet, órajel ) is megfejthetővé teszi. Az eljárás alaplépései a következők:

- referencia rezgés keltése a vevőben
- a referencia rezgés modulálása az ismert PRN kóddal
- az ilyen módon kódolt referencia jel összehasonlítása ( korrelálása ) a műholdról vett jellel; a két jel közötti időeltolódás ( $D t$ ) jelenti a műholdról érkező hullámok terjedési idejét
- a kód eltávolítása a vett jelből, így a navigációs üzenet dekódolható, majd kiszűrhető
- megmarad a modulálatlan vivőhullám, a fázismérés végrehajtható.

Amennyiben a C/A kódot ismeri a vevő, az L1 vivőhullám rekonstruálható. A P kód ismeretében az L1 és L2 is.

A **kód nélküli eljárás** a bejövő jelek négyzetelésén ( *squaring* ) alapul. A kódolás, vagyis a moduláció eltűnik, mivel a kódok +1 és -1 jelsorozatai négyzetre emelés után +1-et adnak. A moduláció megszűnése mellett a frekvencia megkétszereződése érdemel figyelmet. A négyzetelő eljárás előnye hogy független a kódoktól, hátránya hogy a jel/zaj viszony csökken. A két technika együttes alkalmazása is elképzelhető: az L1 vivőhullám rekonstruálása a C/A kód korrelációval, az L2-é négyzeteléssel.

A GPS mérési adatok valójában távolságok, amelyek a vevőben előállított, illetve a vett jelek összehasonlításával, idő- és fáziskülönbség mérése alapján határozhatunk meg. A GPS mérés egyutas módszer, amelyet a műhold és a vevő órajárásai hibái befolyásolnak. Ezért a GPS-mérte, órahibákkal terhelt távolságokat **pszeudo távolságoknak**, ( *pseudorange*, áltávolság) nevezzük.

---

### 4. HELYMEGHATÁROZÁSI MÓDSZEREK

A meghatározási módszereket az alábbiak szerint csoportosíthatjuk:

- abszolút vagy relatív
- statikus vagy kinematikus

Az **abszolút helymeghatározás** egy független, egyponos meghatározás, ahol a koordinátákat kódérésből, pszeudotávolság meghatározásból kapjuk a WGS-84 koordinátarendszerben, a méréssel egyidőben. Ehhez a mérési módszerhez egy vevőkészülék szükséges.

A **relatív helymeghatározás** a pszeudotávolság, vagy vivőfázis szimultán mérését jelenti két vagy több ponton, ugyanazon holdakra. Ehhez a mérési módszerhez legalább két vevőkészülék szükséges. Fázismérésnél a relatív pontosság 1 ppm.

A kapott koordináták a referenciaponthoz viszonyított értékek.

**Statikus mérési módszernél** a vevő az észlelés teljes ideje alatt helyben marad, tehát sok fölös mérési eredmény adódik.

**Kinematikus módszernél** a vevőkészülék folyamatosan mozog, fölös mérés nincs.

Az **abszolút statikus módszernél** 1s-os mérési idő alatt a helymeghatározás pontossága valósidejű mérésnél:

C/A kóddal: 20 - 50m

P kóddal: 5 - 20m

Ha a mérési adatok feldolgozását később végezzük, és pontos pályaelemekkel számolunk, akkor megbízhatóság 2 - 5m lesz. Mivel a C/A kód használata 10-es faktorral gyengíti a pontosságot, P kód használata civil alkalmazóknak nem áll rendelkezésére, ezért ezt a meghatározási módot geodéziai mérésekhez nem használjuk.

Az **abszolút - kinematikus módszerrel** 1 ms -os mérési idő alatt a maximálisan elérhető pontosság 20 - 50 méter. E pontosság eléréséhez a mozgásban lévő vevőnek folyamatosan, szimultán 4 műholdra kell mérnie. Ez a mérési módszer széleskörűen elterjedt a vízi, szárazföldi és léginavigációban. Ezzel a módszerrel a járművek mozgási pályáját lehet meghatározni.

A **relatív statikus módszernek** van a legnagyobb jelentősége geodéziai szempontból, főleg fázismérés esetében, mert így érhető el maximális pontosság GPS -szel. Rövidebb bázisok esetében centiméter alatti. Precíz pályaelemeket használva a pontosság tovább javulhat, elérheti akár a 0.01 ppm -et is. Ez a módszer széleskörűen alkalmazható alappontsűrítésnél, hagyományos terepfelméréseknél, ipari geodéziában, fotogrammetriában.

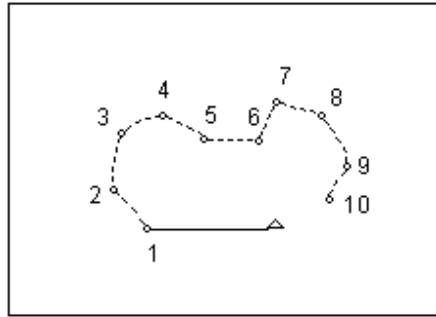
A **relatív - kinematikus módszer** alkalmas a vevő útvonalának rövid idő alatt való meghatározására. A mérést egy álló, és egy mozgó vevővel végezzük. A mérés kezdetekor két ismert ponton abszolút kinematikus módszerrel meghatározzuk a koordinátákat. Ezután az egyik vevőantennát a kezdőponton hagyjuk, a másikkal pedig pontról pontra haladva folyamatos mérést végzünk. Egy - egy új ponton megállva, a mérés időtartama néhány másodperctől 1 percre terjedhet. Vivőfázis mérésekor az elérhető pontosság néhány centiméter, kódméréssel néhány méter. Mivel ezzel a módszerrel nagy számú pont gyors és pontos meghatározása lehetséges, nagy jövője van a geodéziában.

A **kinematikus** módszernek több változatát is kidolgozták, melyeket a különböző elnevezéseikkel ismertettek.

Stop and go ( félkinematikus módszer )

Ez a módszer a statikus és a kinematikus relatív helymeghatározások kombinációja.

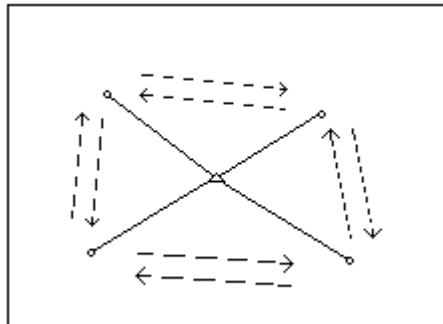
A mérés során az egyik vevő végig egy ponton áll, a másik az új pontok között mozog, majd rövid időre az új ponton megáll. A módszer jellemzője, hogy a meghatározás pontossága az álló helyzetben végzett mérésnél növekszik, mivel az eredmény több mérési adat átlagából születik. Ezt a mérési módszert gyakran csak kinematikus felmérésnek nevezik. ( kinematic surveying )



Pszudokinematikus, vagy megszakított kinematikus módszer

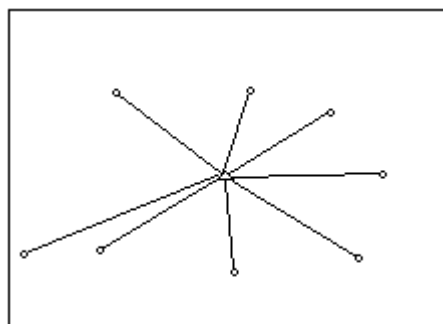
Az új pontokon sorban, egymás után mérnek, majd mintegy egy óra elteltével fordított sorrendben újra mérnek. Így lehetővé válik a többértelműség feloldása, javul a pontosság. Ennek oka, hogy a várakozási időben változik a holdak konstellációja.

E mérésnél a pontok közötti átállás időtartamára a vevők kikapcsolhatók. Ez a mérési módszer reokkupációs módszer néven is ismert. ( reoccupation method )



Gyors statikus módszer

Itt a gyors inicializáláshoz, azaz a többértelműség feloldáshoz a kód - és vivőfázis mérések kombinációját alkalmazzák. Itt az egyébként hagyományos statikus módszerrel végzett mérésnél mindkét frekvencián mérni kell a vivőfázist, és a kódot is. 5 -10 perces mérés után 1 ppm megbízhatóság érhető el.( fast static, rapid static)



On the fly ( OTF ) módszer

Ez egy inicializálási módszer, melyet főleg kinematikus méréseknél alkalmazunk. Ez a kóddal segített technika, amely a többértelműség feloldására szolgál, lehetővé teszi mozgó járművek helyzetének deciméter, sőt centiméter pontosságú meghatározását.

---

## 5. MILYEN PONTOS A GPS ?

Aki először érdeklődik a GPS technika iránt, nem mulasztja el feltenni a kérdést: milyen pontosságú pontmeghatározás érhető el GPS - szel ? A válasz nem egyszerű. Ennek az az oka, hogy a GPS - nek sokféle gyakorlati alkalmazása létezik. Minden alkalmazásnak más a célja, technikai feltétele, és ezért a pontossága is. Ahhoz, hogy az adott célnak, a megkívánt pontosságnak legmegfelelőbb módszert választhassuk, el kell igazodnunk a GPS mérési módszerek között. Ezt a tájékozódást segíti néhány alapvető fogalom definíciója (Hofmann-Wellenhof, 1992 alapján) és egy grafikon, amelyről a helymeghatározás pontosságára vonatkozó adatok leolvashatók. ( Stansell, 1988 )

**A kódmérésről és a vivőfázis mérésről már volt szó. Emlékeztetőül annyit, hogy a kódérés pontossága durván méteres, a fázismérésé milliméteres nagyságrendű. A fázismérésnél fellép a többértelműség problémája, melynek feloldására számos megoldás született, a kutatás tárgya ma is.**

A **valós idejű (real - time)** alkalmazások megkövetelik, hogy a vevő azonnal, a mérés helyszínén, rövid időn belül határozza meg helyzetét. Az azonnal szigorúbb definíciója azt jelenti, hogy egyetlen időpontban végzett mérés alapján, elhanyagolhatóan rövid számítási idő után szolgáltatssa a vevő pozícióját. A GPS eredeti koncepciója ugyanis mozgó jármű ( hajó, repülőgép, autó, stb ) valós idejű navigációja. **Utólagos feldolgozással ( postprocessing )** a lehetőségek bővülnek. A tárolt mérési adatokat kombinálni lehet más pontokon mért adatokkal, így bizonyos hibaforrások jelentősen csökkenthetők, a pontosság növelhető. Egyedi pontmeghatározásról ( *point positioning* ), vagy a magyar szakirodalomban elterjedt kifejezéssel élve **abszolút pontmeghatározásról** akkor beszélünk, ha egyetlen ponton álló vevővel, általában kód korrelációs technikával egyszerre minimálisan négy GPS holdra végzünk méréseket, és a pont koordinátáit ezekből számítjuk ki. A **relatív pontmeghatározás** előfeltétele, hogy legalább két ponton folyjon fázismérés ugyanazon GPS holdakra. Az egyik pont koordinátái rendszerint nagy pontossággal ismertek ( ez a referencia pont ), a másikéi ismeretlenek. A módszer valójában a két pont közötti vektort adja meg, innen a relatív elnevezés. A feldolgozási módszer a mérésekből képzett különbségekkel való számításon alapul, melynek során bizonyos hibák eltűnnek, vagy hatásuk jelentősen csökken. Szokás **differenciális pontmeghatározásról** beszélni, ha hasonló eljárást alkalmazunk, kódéréssel kapott pszeudo távolságok felhasználásával. A " relatív " és " differenciális " elnevezések sajnos sokszor keverednek egymással.

**Statikus** pontmeghatározás alatt azt értjük, hogy a vevő a mérendő ponton áll, míg **kinematikus** technikáról van szó, ha a vevő mozog mérés közben. Néhány tipikus mérési módszert sorolunk fel:

### - **statikus abszolút pontmeghatározás**

Viszonylag rövid mérési idő után, mérsékelt ( 5 - 10 m ) pontosságot érhetünk el, kódéréssel.

### - **kinematikus abszolút pontmeghatározás**

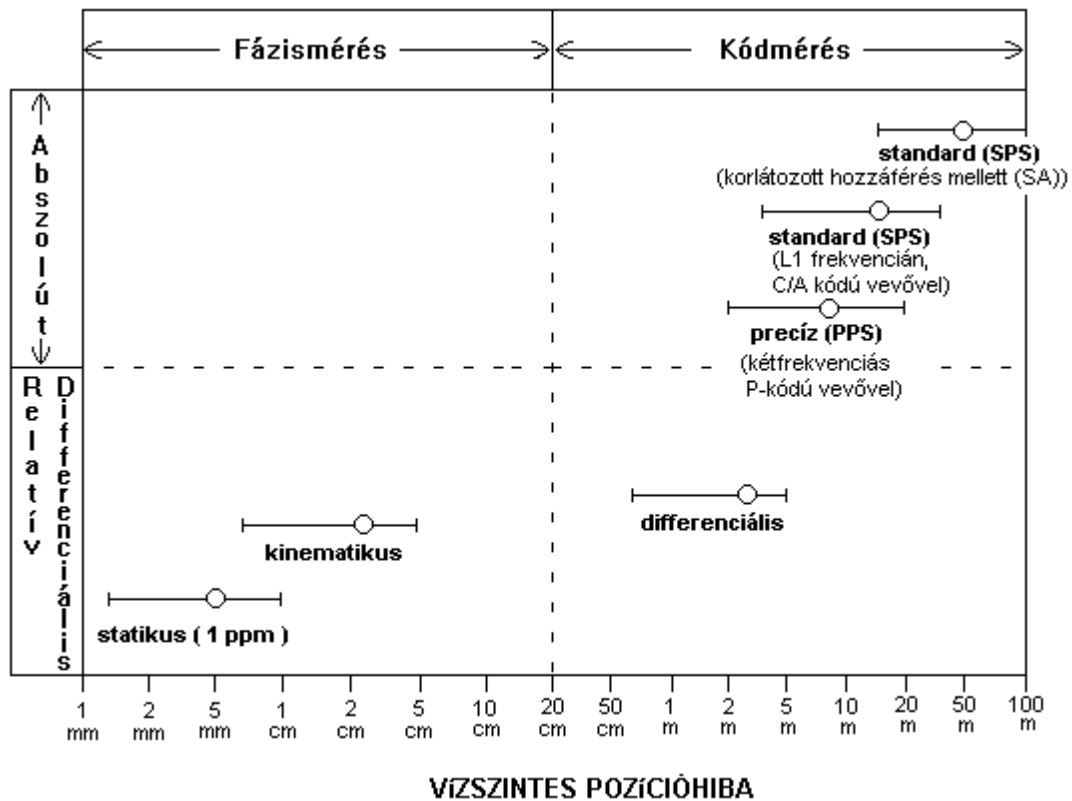
A kódérések felhasználásával, mozgó járművek helyzetét 10 - 100 m-es pontossággal határozhatjuk meg.

### - **statikus relatív pontmeghatározás**

Vivőfázis mérések felhasználásával történik. A geodéziában ez a leggyakrabban alkalmazott módszer, melynek segítségével a GPS szélső pontossága ( 1 ppm...0.1 ppm ) elérhető. 1 ppm ( egy milliomodrész ) pontosság néhány kilométeres bázisvonalon néhány milliméter hibát jelent. Két vagy több álló vevő közötti vektor meghatározásán alapul. Az így kapott koordináták természetesen öröklik a referencia pont koordinátáinak esetleges pontatlanságát.

### - **kinematikus relatív ( vagy differenciális ) pontmeghatározás**

Egy álló referencia vevő, és egy mozgó műszer ( rover ) szimultán mérése. A relatív technika miatt a pontosság nagyobb mint az abszolút eljárás esetén. Fázismérés esetén a pontosság elérheti a centiméteres, kódméréssel ( ezt nevezzük differenciális technikának ), a méteres nagyságrendet.



A szakaszok közepén lévő kör jelzi a legvalószínűbb értéket, az eredmények

5-5 % -a lehet rosszabb ill. jobb, mint amit a szakaszok két végpontja jelöl.

Felhasznált irodalom: Földmérési és Távérzékelési Intézet Kozmikus Geodéziai Observatórium GPS tanfolyam jegyzet 1993 - 94

# A GPS-rendszer



# Mi a GPS?

- A GPS (Global Positioning System) Globális Helymeghatározó Rendszer, az Amerikai Egyesült Államok DoD (Department of Defence) Védelmi (Elhárítási) Minisztériuma által (elsődlegesen katonai célokra) kifejlesztett és üzemeltetett - a Föld bármely pontján, a nap 24 órájában működő - **műholdas helymeghatározó rendszer**. A rendszer előnye, hogy független:
  - - időjárástól
  - - napszaktól
  - - légköri viszonyoktól
  - - földfelszín feletti magasságtól
  - - mozgási sebességtől (a műszerrel akár vadászgépen is mérhetünk)

# A GPS előzményei

Az ember már a kezdetek óta érdeklődött a helye, helyzete iránt a Földön. Az első "helymeghatározásra" irányuló törekvések már a korai ókorban jelentkeztek. Az utazók, felfedezők, hogy el ne tévedjenek, megjelölték a megtett utat, pl. útmenti kövekkel, vagy festékekkel. Ha azonban az eső lemosta a festéket, vagy a hó belepte a köveket, felfedezőnk nagy valószínűséggel örökre elveszett. Igaz, a Föld akkor még "lapos" volt és korong alakú, mely korong széleinél a nagy űr tátongott. Az akkoriban utazók részére - hogy véletlenül se "essenek le" a Föld szélénél - megfelelő leírások, utalások készültek. Ezek a leírások általában a környezet, a mindenki által látható tereptárgyak leírásai voltak. Később, amikor az emberiség elkezdett utazgatni és beindult a "korai turizmus", a föld-kép kezdett egyre nőni, gömbölyödni. A tengereken, óceánokon hajózni kellett, már nem voltak elegendők az útleírások, itt már nem lehetett útjelző köveket használni. A csillagászati navigáció, az égitestek (Nap) magasságának meghatározása kezdett fejlődni. Ezen helymeghatározási módszerek pontossága (néhány mérföld) a korabeli igényeknek megfelelt, azonban kötött volt: ha borús idő volt, nem lehetett a Nap magasságát megmérni, ha megállt a kronométer - megállt a tudomány, éjszaka, ha nem volt derűs az ég, könnyen el lehetett tévedni a tengereken, vagy a sivatagokban...

- A fenti problémák kiküszöbölésére tökéletesedtek a kronométerek, iránytűk, de az igények növekedésével már ezek sem voltak elegendőek. Kb. 100 évvel ezelőtt, már üzeneteket lehetett eljuttatni fizikailag össze nem kötött helyek között, valós időben is (drótnélküli távíró). Innen már csak egy ugrás a távirányítás. A távirányítás fejlődésének feltétele volt az is, hogy a távirányított szerkezetek helyét mindig pontosan meg lehessen határozni. A kezdetleges megoldások után a rádiózás beindulásával, a hang sebesség mérésének felfedezésével (Doppler), majd alkalmazásával a navigációs helymeghatározó rendszer is egyre tökéletesedett. A hajózásnál a hajók, jachtok irányítására kifejlesztették a LORAN és a DECCA rádió navigációs "láncálózatot". Ezek megfelelőek voltak olyan helyeken, ahol a LORAN láncok ki voltak építve, de pontosságuk függött a rádióinterferenciás zavaroktól, a földrajzi helyzettől stb. Ahol pedig nem volt fogható az adás...
- Néhány újabb évtized, és az ember uralja (?!) a világűr. Természetesen a fizika és a társtudományok (elektronika) rohamos fejlődése a navigáció fejlődésére is kihatott. Megjelent az első műholdas helymeghatározó rendszer a Transit System vagy "Sat-Nav" (a GPS előfutára). Ez a rendszer már az emberi kéz alkotta "csillagok, holdak" magasságát mérte. A nehéz kezdet után (hisz ezek az alacsony pályás műholdak úgy hullottak mint "az őszi légy") lassan kialakult a mai értelemben vett GPS.

# A GPS alapok

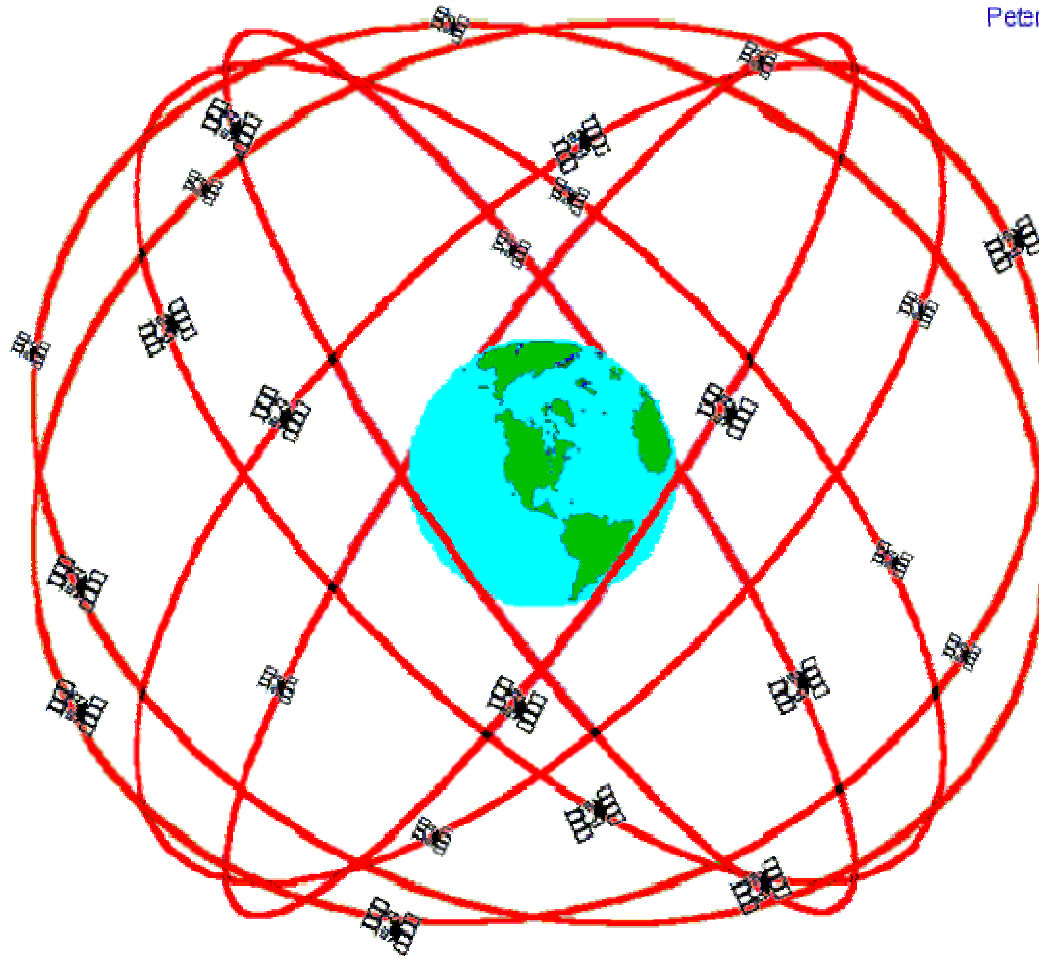
- A GPS egy magasszintű helymeghatározó rendszer, amellyel 3 dimenziós helyzetmeghatározást, időmérést és sebességmérést végezhetünk földön, vízen vagy levegőben. Pontossága jellemzően méteres nagyságrendű, de differenciális mérési módszerekkel akár mm pontosságot is el lehet érni, valós időben is. A rendszer előnye, hogy a helymeghatározás nagy magasságban keringő műholdak (24 db.) segítségével történik, így a rendszer folyamatos mérési lehetőséget biztosít bármilyen közegben, napi 24 órában. A rendszer fejlesztése és felállítása igen nagy összegeket emésztett fel (indításkor kb. 12 milliárd USD), magas műszaki fejlettséget követel, így nem csoda, ha az USA védelmi minisztériuma a mecénás. Mivel annak idején (1970), amikor a rendszert elkezdték fejleszteni, ez már része volt az ún. "csillagháborús tervnek", szigorúan titkos volt. Idővel csökkentek a pénzügyi források, megindult a politikai "felmelegedés", a rendszer kezdett egyre nyíltabbá válni, annyira, hogy már néhány éve akárki (akinek van rá pénze, hisz nem olcsó műszer) megveheti. A műszer megvétele után annak beüzemelése percek kérdése.
- Ma főbb felhasználói a katonaság mellett:
  - - az űrkutatás
  - - a navigáció
  - - a geodézia
  - - a közlekedés
  - - a földtudományok
  - - az erőforrás kutatások
  - - valamint az expedíciós kutatók.

# Hogyan működik a GPS?

- A GPS működésének alapelvei igen egyszerűek. Ezeknek az ötleteknek a gyakorlatba való átültetéséhez, valamint a rendszer rendkívül pontos működéséhez napjaink legfejlettebb technikájára van szükség.
- A rendszer felépítése:
  - - 24 db, 12 órás keringési idejű műholdból (6 pályasíkon egymáshoz képest 60 fokkal elforgatva, az egyenlítőhöz viszonyított pályaelhajlás 55 fok),
  - - 5 db földi ún. monitor állomás, 4 feltöltő és 1 központi vezérlő
  - - GPS vevőberendezés, amelyből számtalan lehet, a Föld bármely pontján
- A műholdas helymeghatározó rendszer gyakorlatilag egy "egyszerű" időmérésből kiszámított távolságmérésen alapul. Mivel ismerjük a rádióhullámok terjedési sebességét, ha van két nagyon pontos óránk, és ismerjük a rádióhullám kibocsátásának és beérkezésének idejét, ezek alapján meghatározhatjuk a forrás távolságát. Ez a meghatározási módszer nem egyszerű folyamat. Az áttekinthetőség kedvéért az alábbi főbb részekre bontjuk e technikát:
  - Az adott helyzetű műholdaktól való távolságok ismeretében a keresett pont koordinátáinak számítása
  - Távolságmérés rádióhullámok segítségével
  - A távméréshez szükséges igen nagy pontosságú időmérés
  - A műhold pontos helyének meghatározása
  - A GPS jel ionoszférikus és atmoszférikus késleltetésének és torzításának figyelembevétele

# A műholdak elhelyezkedése

Peter H. Dana 9/22/98

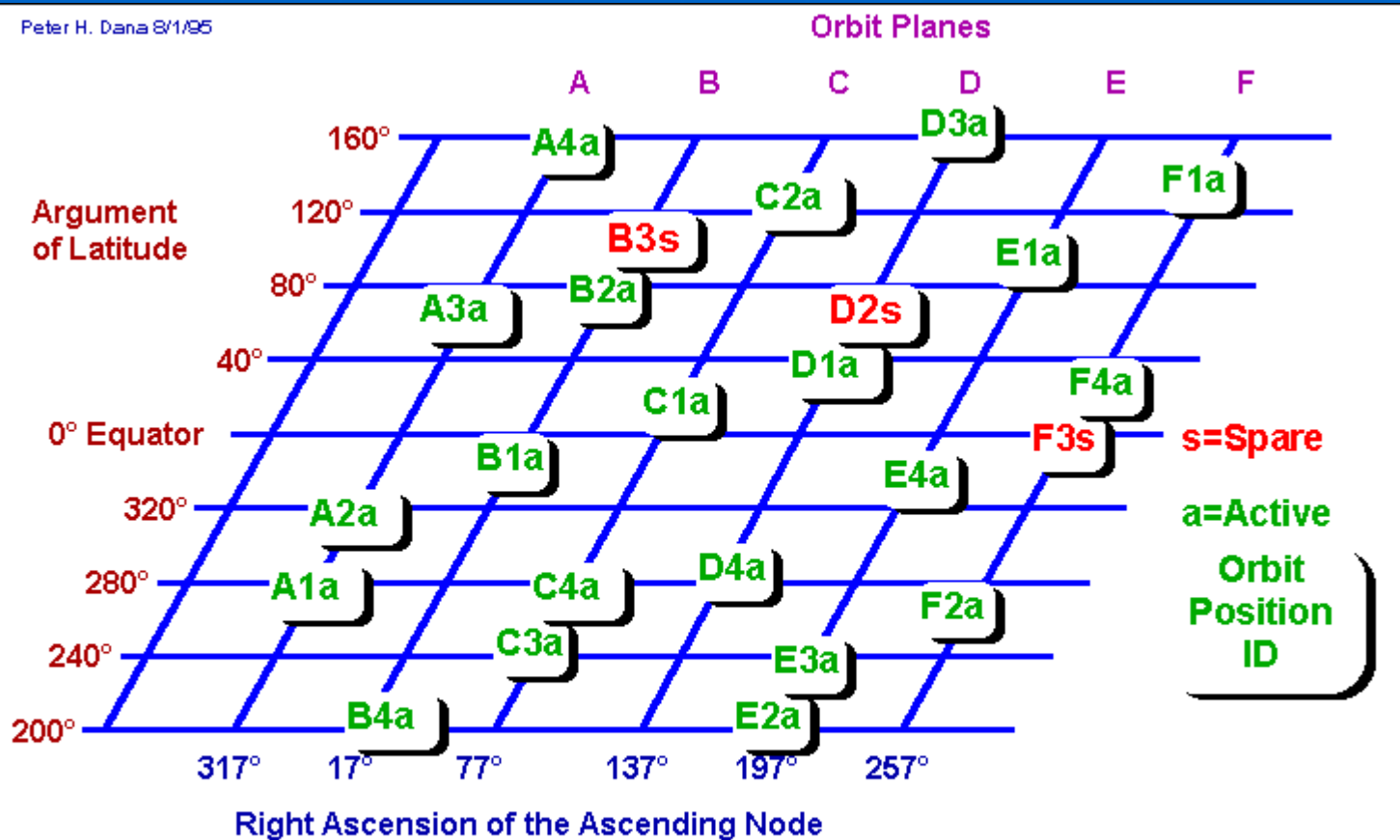


**GPS Nominal Constellation**

**24 Satellites in 6 Orbital Planes**

**4 Satellites in each Plane**

**20,200 km Altitudes, 55 Degree Inclination**



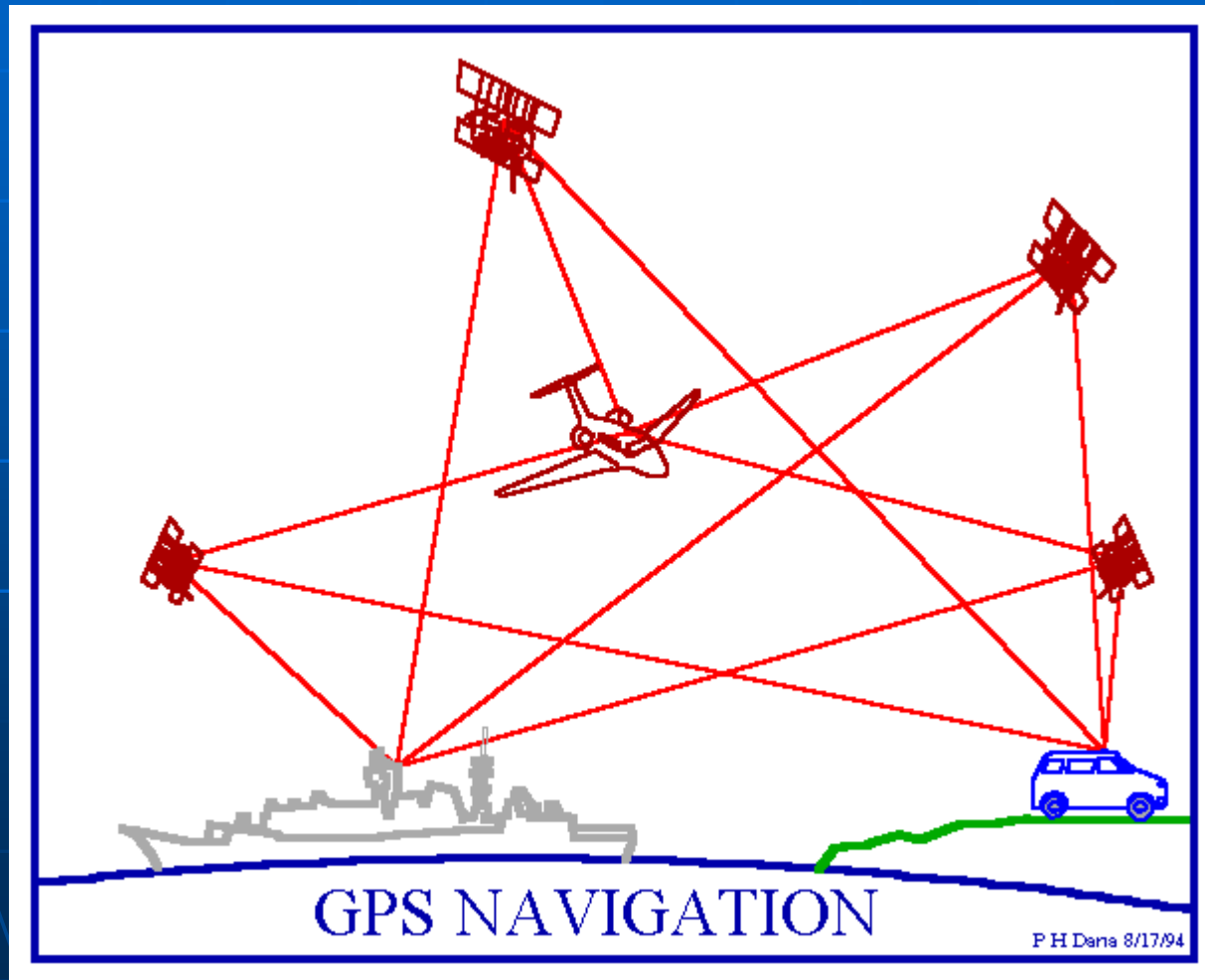
**Simplified Representation of Nominal GPS Constellation**

# A GPS alapötlet

- A GPS rendszer lényege a műholdas távolságmérés. Ha ismerjük néhány műholdtól való pontos távolságunkat és egy (a referenciapontként szolgáló) műhold helyét, saját helyzetünket a következőképpen számíthatjuk ki:
- Tegyük fel, hogy tudjuk azt, hogy egy műhold tőlünk  $X$  km távolságra van. Ha csak ez az adat volna a birtokunkban ez azt jelentené, hogy mi a térben egy  $X$  km-es sugarú gömb felületén volnánk valahol.
- Tegyük fel, hogy egy másik műhold tőlünk  $Y$  km távolságra van. Matematikai törvényszerűségek tudatában ilyenkor a lehetséges helyzetünk csakis az  $X$  és az  $Y$  sugarú gömbök metszetén keletkező körön lehet valahol.
- Egy harmadik műholdtól való távolság ismerete esetén a lehetséges pozíciók száma kettőre csökken! Általában e két pont közül az egyik vagy irreálisan messze van a Föld felszínétől, vagy mélyen a Föld gyomrában van, ebből adódik, hogy a másik a mi pozíciónk. Azt, hogy e két pont közül melyik a helyes, más módszerrel is eldönthetjük:
- 1., mérjük egy negyedik műholdtól való távolságunkat (a negyedik gömb csak a mi pontunkat metszheti)
- 2., ha a tengeren vagyunk (tengerszint feletti magasság=0m), felhasználva az ismert Föld(gömb)sugarát a keresett pont meghatározható
- Mint látjuk általában elegendő 3 műholdtól való távolság ismerete, de a gyakorlatban mégis négyet használunk, hogy miért, a későbbiek során erre külön kitérek.



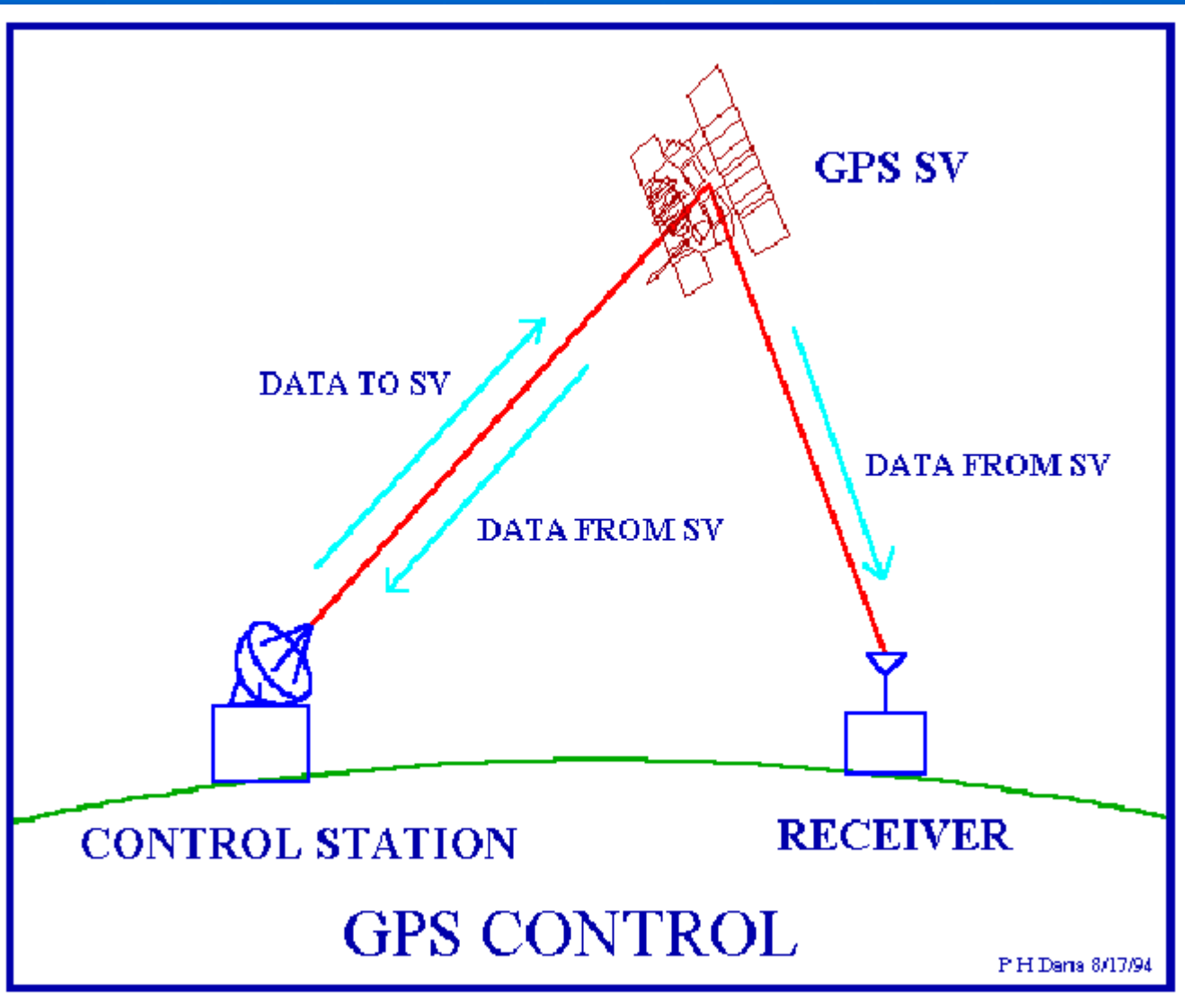
# A GPS navigáció



# A műholdaktól való távolság meghatározása

- A műholdaknak a vevőkészüléktől való távolsága egyszerűen a műholdak által kisugárzott jelek beérkezési idejéből számítható ki (sebesség  $\times$  idő = távolság). Mivel tudjuk azt, hogy a rádióhullámok fénysebességgel terjednek, így a nagyon nagy terjedési sebesség miatt, nagyon pontos időmérésre van szükségünk. Ha a meghatározandó műholdunk zenitben van, akkor kb. 0.06 másodperc alatt ér le a mérő jel róla, gyakorlatilag tehát a vevő mérő órájának 0.000000001 másodperc pontossággal kell mérnie a cm-es mérési pontosság eléréséhez.
- Adódik egy másik probléma is, nevezetesen: ismernünk kell a kibocsátott mérőjel indulásának időpontját. A fejlesztők ezt a problémát úgy oldották meg, hogy mind a műhold, mind a vevő ugyanazt a jelet generálja szinkronban egymással. A vevő összehasonlítja a beérkezett jelet a sajátjával, és méri a késési időt. Ehhez olyan jelet kell alkalmazni, amellyel bármely pillanatban meghatározható az időkülönbség.
- A GPS rendszer különböző periódusú pseudo-véletlen (pseudo-random) kódokat használ. Ezek az ún. P- és C/A-kódok.

# A GPS irányítás, vezérlés



# A GPS-jel

- A műhold két mikrohullámú jelet küld a vevő felé. Ezek az L1 és L2 frekvenciák.
- Az L1 frekvencia 1575,42 MHz.
- Az L2 frekvencia 1227,60 MHz.
- Az L1-en küldi a navigációs adatokat és az SPS-kód jelet
- Az L2-n küldi az ionoszférikus és más zavaró tényezőkből adódó módosítás adatait és a PPS-kód jelet.

## **SPS:** Standard Positioning Service

Világszerte ezt alkalmazzák a civil életben.

Az SPS jellemzői:

- 100 méter vízszintes pontosság
- 156 méter függőleges pontosság
- 340 nanosecundum időbeni pontosság

## **PPS:** Precise Positioning Service

Nagyobb pontosságú mérést engedélyez, mint az SPS.

Az amerikai védelmi erők által meghatározott és alkalmazott mérési pontosság előírásait tartalmazza.

A PPS jellemzői:

- 22 méter vízszintes pontosság
- 27,7 méter függőleges pontosság
- 200 nanosecundum időbeni pontosság

**L1 CARRIER 1575.42 MHz**



**C/A CODE 1.023MHz**



**NAV/SYSTEM DATA 50 Hz**



**P-CODE 10.23 MHz**



**L2 CARRIER 1227.6 MHz**



**L1 SIGNAL**

**L2 SIGNAL**



Mixer



Modulo 2 Sum

# GPS SATELLITE SIGNALS

# Az időmérés

- Ha tudjuk azt, hogy a rádióhullámok a fény sebességével terjednek, és feltételezzük, hogy a GPS vevőnk és a műhold között 0.01 másodperces szinkronizálási hiba keletkezett, akkor könnyen kiszámítható, hogy a mérésünk hibája 3000 km lesz! Hogyan mérjünk akkor tökéletesen? Az adóoldalon viszonylag egyszerű a megoldás hiszen a műholdakon 4 atomóra működik (rubídium és cézium), melyek rövid idejű frekvencia stabilitása  $10^{-12}$  -  $10^{-13}$ . Ezeknek az óráknak az ára 100000 USD nagyságrendű. A pontosságuk is megfelelő. Marad a vevő oldali órák pontosságának növelése. Természetesen nem alkalmazhatunk minden GPS vevőben atomórát (csak az ára az oka), de egy kis ügyes csellel, egy egyszerűbb olcsóbb "sima kvarcóra" is megteszi.
- Ez a kis csel tulajdonképpen az, hogy + 1 mérést kell végeznünk (még egy műhold szükséges). Az előző fejezetekben már említett + 1 mérés segítségével kiegyenlíthetjük a vevőoldali időmérési hibát.
- Magyarázat (csak 2 dimenzióra, de természetesen érvényes 3D-ben is):
- Mint eddig sokszor, most is matematikai magyarázat van a dolgok háttérében: trigonometriai összefüggés állítja, hogy térben egy pontot meghatározhatunk 3 pontos méréssel, vagy 4 olyan pontatlan méréssel amelynél a mérési hiba konstans.

# A műholdak

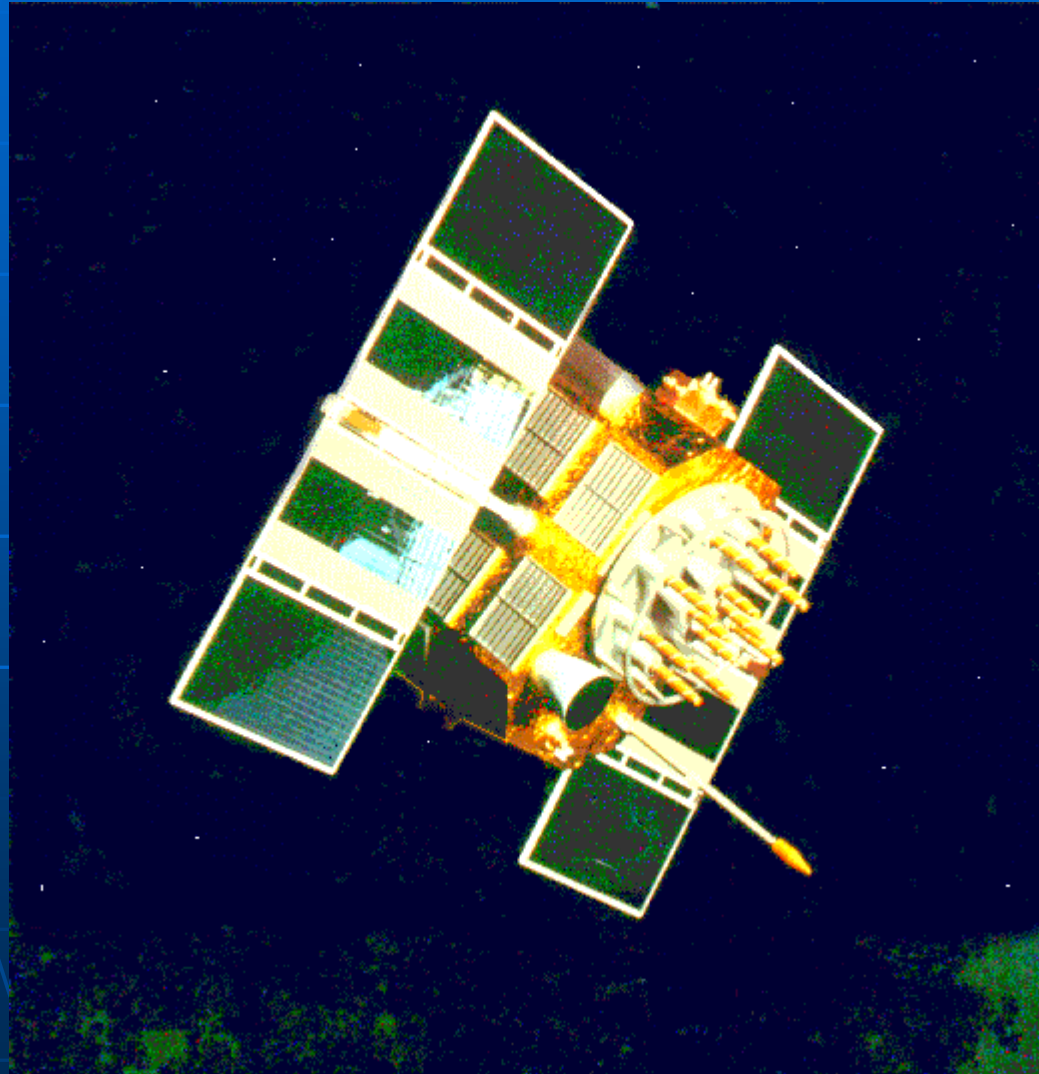
- Az előző pontokban feltételeztük, hogy pontosan tudjuk a műholdak távolságát, hogy hol helyezkednek el. De hogyan határozhatjuk meg egy kb. 20000 km távolságra lévő objektum helyét akár mm pontosan? A pontosság titka a nagy távolság. A műhold jóval a földi atmoszféra felett kering, így pályája igen nagy pontossággal kiszámítható. A szatellitek pályára állítása igen nagy precizitással történik. Mivel ezen műholdak pályája igen nagy pontossággal előre meghatározható, így sok GPS vevő memóriájában megtalálható az ún. almanach, amely tulajdonképpen a műholdak pillanatnyi helyzetét tartalmazza (matematikai formulák képében).
- Noha a pályák matematikai modellje önmagában is igen pontos eredményt szolgáltat, de a precízség növelése érdekében az USA védelmi minisztériuma (DoD) létrehozta a földi figyelő és követő hálózatát, amely feladata a GPS műholdak követése, napi vizsgálata, aktuális pozícióik és sebességük mérése, az esetleges pálya- és egyéb korrekciók végrehajtása és a pontosított adatoknak (pl. almanach) a műholdakra történő eljuttatása. Az ún. ephemeris hibák nagyon kicsik, de nem elhanyagolhatók, oka a Nap és a Hold gravitációs mezeje valamint a szoláris radiáció hatása.
- A GPS műholdak nemcsak az időzítő jelet sugározzák, hanem adatüzeneteket is sugároznak a GPS vevők számára. Ezek a jelek tartalmazzák az ún. almanach adatokat, a korrekciós pályaadatokkal valamint a rendszerinformációkkal. Ha egy műhold nagyon eltér a számított pályától, akkor a Földi irányító központból ki lehet ideiglenesen kapcsolni, hogy ne zavarja a pontos méréseket, majd miután a műhold ún. pályakorrekciós meghajtóművével visszaáll a számított pályára, újra fel lehet "éleszteni". A jobb minőségű GPS vevők automatikusan rögzítik és alkalmazzák az almanachban foglalt korrekciókat, a pontosabb műhold pozíciók számítására.



# A GPS műholdak műszaki adatai:

- Név: NAVSTAR
- Gyártó: Rockwell International
- Magasság: 20200 km
- Súly: 850 kg (pályára állás után)
- Méret: kb. 6 méter a nyitott napelemekkel
- Keringési idő: 11 óra 58 perc
- Elhelyezkedés: 6 pályasík, egymáshoz képest 60 fokkal elforgatva, 55 fokos pályasík-elhajlás az egyenlítőhöz képest
- Tervezett élettartam: kb. 7.5 év
- Keringő példányok: állandóan változnak, ma még kb. 10 db. ún. Block I prototípusú műhold van az űrben, amit folyamatosan felváltanak Block II típusúakra.
- Konstelláció: 24 műhold

# A műhold



# A földi monitor állomások

- A monitorállomások feladata, hogy nyomonkövessék, és adatot szolgáltatson a műhold pontos helyéről és helyzetéről.
- 1 fő- és 4 segédállomás található.

