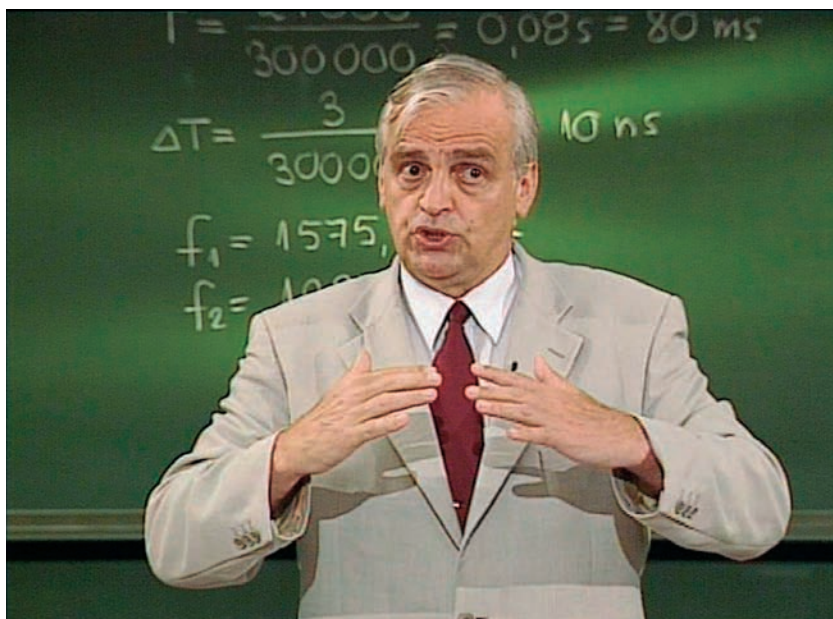


PAP LÁSZLÓ

A technika új csodája: a globális helymeghatározás



Pap László
villamosmérnök
az MTA levelező tagja

1943-ban született. 1967-ben a Budapesti Műszaki Egyetemen villamosmérnöki oklevelet szerzett. 1980-ban a műszaki tudományok kandidátusa, majd 1992-ben akadémiai doktora lett; 2001-től az MTA levelező tagja.

Pályáját 1967-ben a Budapesti Műszaki Egyetemen kezdte. 1992-től egyetemi tanár, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Kar Híradástechnikai Tanszékének vezetője, az egyetem rektorhelyettese. Vendégprofesszorként előadásokat tartott többek között a Veszprémi Egyetemen, illetve a Klagenfurti Egyetemen. A Híradástechnikai Tudományos Egyesület alelnöke, az MTA Távközlési Rendszerek Bizottságának és a MATÁV Rt. Felügyelő-Bizottságának elnöke, a Magyar Űrutas Tanács tagja.

Fő kutatási területei: a szórt spektrumú kommunikáció, a mobilrendszerek következő generációját meghatározó kódosztású technológia, továbbá az elektronikus áramkörök, a korszerű modulációs technikák és áramkörök, valamint a hírközlés elmélete.

A földrajzi helyzet meghatározására már a legrégebbi civilizációk is ismertek módszereket. A 20. század végén született műholdas globális helymeghatározó rendszerek (pl. a GPS) a korábbi feladatokat rendkívül nagy pontossággal tudják végrehajtani, s számtalan új feladat megoldására is alkalmasak. Az előadás betekintést nyújt a földrajzi pozíció kiszámításához szükséges fizikai és matematikai ismeretekbe. Megismerkedhetünk a GPS-rendszerek működési elvével, és ennek technikai megvalósításával, vagyis a műholdas infrastruktúra elemeivel, a műholdak és a GPS-vevők közötti kommunikáció módjával. Gyakorlati példákon keresztül pillanthatunk be a helymeghatározó rendszerek széles körű alkalmazási lehetőségeibe a geodéziai, ipari, közlekedési területektől egészen a szabadidős felhasználásokig.

A helymeghatározás előtörténete

A földrajzi helyzet meghatározásának igénye már az emberiség ősi történelmi korszakaiban is felmerült. A következőkben a helymeghatározás fejlődésének legfontosabb mozzanatait foglalkoztatjuk össze.



Stonehenge, részlet

Navigáció:

az a technika, amellyel a vízi és légi járművek vezetői közlekedési eszközüket az általuk kívánatosnak tartott útvonalon irányítják.



Asztrólabium, 13. sz.

A kezdeti időben, az emberiség történetének hajnalán a helyzet meghatározásához – azaz a földrajzi tájékozódáshoz – a fontosabb tereptárgyak (sziklák, magasabb fák, folyómedrek) és az égi objektumok (Nap, fényesebb csillagok) megfigyelését használták. A távolságot pedig tipikusan a lépések leszámlálásával vagy esetleg a sebesség és az út megtételéhez szükséges idő becslésével határozták meg.

A nagy ősi civilizációk – elsősorban kulturális és asztrológiai célokat követve – igen magas szintre emelték az égi objektumok (a Nap, a Hold, a fényesebb csillagok és bolygók) mozgásának megfigyelését. Ma biztosak vagyunk abban, hogy például Stonehenge szikláit vagy az egyiptomi piramisokat ilyen célokra is használták. Az égi objektumok megfigyelése során kialakult elméleti és gyakorlati ismereteket a térképészet tudományának szolgálatába állították. Időszámításunk előtt 201-ben Eratoszthenész már képes volt arra, hogy a földrajzi helyek szélességi adatai közötti különbséget közelítőleg meghatározza a delelő Nap helyzetének megfigyelésével (erre alapozva még a Föld sugarát is megbecsülte). Így már igen korán kialakultak azok az eljárások, amelyek alkalmasak voltak az észak–dél irányú helyzet becslésére. A kelet–nyugati irányú helyzetkülönbségeket a megtett út vagy a sebesség és az idő mérésével határozták meg.

A tengeri kereskedelmet és a távoli földrészek meghódítását, azaz a földfelszíni **navigációt** igen erőteljesen támogatta a kínai eredetű mágneses iránytű európai elterjedése.

A középkortól kezdve a helymeghatározáshoz szükséges technológiai fejlesztések igazi motorja a tengeri navigáció volt. A fejlődés a 13. században indult meg, és a 16. századra az északi féltekén a földrajzi szélességet már igen pontosan meg tudták meghatározni a Sarkcsillag helyzetének mérésével. A 18. századtól a földrajzi hosszúság elfogadható pontosságú meghatározását a nagy precizitású kronométerek kifejlesztése tette lehetővé. A pontos kronométer kifejlesztését az angol kormány az angol kereskedelmi flotta 1707-ben bekövetkezett katasztrófája után kezdeményezte, és az erre a célra kiírt pályázatot John Harrison nyerte meg egy komplikált, de egyszerű mérnöki alkotással. A tengeri hajózás elmúlt századaiban a földrajzi

Tengerésznapár, 17. sz.



szélességet szextánszal, a földrajzi hosszúságot kronométerrel és a Nap delelési idejének megfigyelésével határozták meg. Ezeket a globális mérési adatokat kiegészítették tengerparti jelzőpontok (világítótornyok, sziklák) megfigyelésével és a hajózási sebesség mérésével.

A tengeri navigációval párhuzamosan a térképészet és a geodézia is folyamatosan fejlődött. Egyre pontosabb térképeket készítettek, a mindennapi életben egyre nagyobb lett az igény a mérések pontosságának növelésére. A földmérés tudományának kezdetei a régi egyiptomi időkre nyúlnak vissza, később a görögök és rómaiak fejlesztették tovább a technológiát, és módszereiket széles körben használták a települések felmérésére. A térképészetben forradalmi előrelépést jelentő háromszögelés módszertanát a holland Snell van Royen fejlesztette ki, az eljárást nagyobb földrajzi területek felmérésére először a francia Jean Picard és G. D. Cassini alkalmazta.

A 20. század elejéig a hagyományos tengeri navigációs eszközök kielégítették a felhasználók igényeit, a légi navigáció azonban új megoldásokat követelt. Bár az iránytűket, magasságmérőket és szextánsokat továbbfejlesztették és új sebességmérő eszközöket is kifejlesztettek, az alapvető újdonságot a **rádiós iránymérés** technológiájának bevezetése jelentette, amely már átvezet a mi témánkhoz, a műholdas globális helymeghatározás módszeréhez.

A hagyományos geodéziai technológiák és mérési eszközök segítségével a 20. században is megoldották a problémák döntő többségét, de a globális geodéziai feladatokhoz, például a különböző földrészek egymáshoz viszonyított mozgásának pontos méréséhez új módszerekre volt szükség.

A műholdas **globális helymeghatározó rendszer** (Global Positioning System – GPS) olyan új és korszerű technológia, amely hagyományos feladatokat új eszközökkel old meg. A műholdas globális helymeghatározás nem önálló tudományterület, hanem több tudományterület (geodézia, geofizika, űrtudomány, űrtechnológia, elektromágneses térelmélet, rádiótechnika, híradástechnika, elektronika, számítástechnika, informatika, mérés technika, szabályozástechnika stb.) eredményeit felhasználó műszaki megoldás.

A helymeghatározás elvi módszerei

A helymeghatározás módszereit néhány egyszerű feladattal szemléltetjük, melyek a középiskolai matematika, illetve analitikus geometria alapján könnyen megérthetők.

Egy objektum helyzetének meghatározása általában annyit jelent, hogy egy referencia-**koordináta-rendszerben** megadjuk az objektum helyzetét jellemző pont koordinátáit.

Az 1. ábrán látható helymeghatározási feladat nem jelent mást, mint a P pont ismeretlen (x, y, z) koordinátáinak a meghatározását, azaz az objektum helyzetére jellemző távolságok megadását. Ha például az x és y tengelyek a vízszintes síkban vannak, akkor a z érték a P pont magassági helyzetére jellemző adat.

A helymeghatározás feladata csak akkor értelmezhető, ha van egy refe-

Rádiós iránymérés:

technológia, mellyel a rádióvevőkészülékek képesek a számukra jeleket küldő rádióadó földrajzi irányát meghatározni.

Globális műholdas helymeghatározás (GPS):

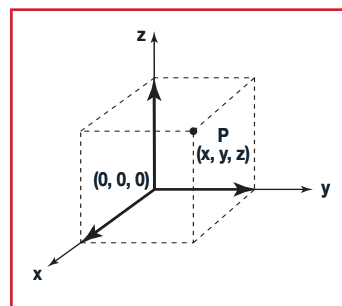
olyan technológia, mely műholdak segítségével képes a földrajzi helyzetet meghatározni a Föld bármely pontján.

Koordináta:

valamely pont koordinátái az illető pont helyzetét jellemző számok. Ilyen például a földrajzban a Föld felszínén levő valamely pont (város, hegycsúcs) geográfiai hosszúsága és szélessége, az asztronómiában egy csillag magassága és azimutja, vagy bármely más két csillagászati koordinátája.

Koordináta-rendszer:

a koordináták olyan rendszere, melyekkel minden pont helyzete egyértelműen meghatározható.



1. ábra. Egy pont helyzetének jellemzése a háromdimenziós derékszögű Descartes-koordináta-rendszerben



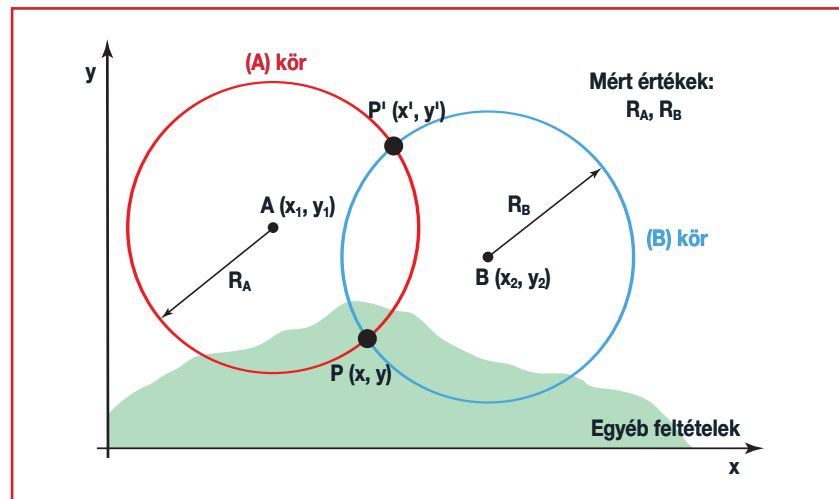
renca-koordináta-rendszer, és tipikusan vannak ismert helyzetű pontok, amelyekhez a P pont helyét, azaz saját helyzetünket viszonyítani tudjuk.

Most tekintsük át a legfontosabb helymeghatározási módszereket, elsősorban azokat, amelyek témánkhoz közvetlenül kapcsolódnak. A továbbiakban az egyszerűbb áttekinthetőség érdekében a módszereket a kétdimenziós síkon fogjuk illusztrálni.

A távolságmérésen alapuló helymeghatározás

Tételezzük fel a 2. ábra alapján, hogy ismert az A és B pontok helyzete a kétdimenziós síkon, és mérni tudjuk a saját helyzetünket jelző P pont és az A és B pontok közötti távolságot, R_A -t és R_B -t.

2. ábra. Távolságmérésen alapuló helymeghatározás



Ilyenkor a P pont helyzetének meghatározásához elegendő az A és a B pontok körül felrajzolni az R_A és R_B sugarú (A) és (B) kört, és a körök metszéspontja megadja a P pont helyzetét. Jól látható, hogy R_A és R_B ismerete a P pont pontos helyzetének meghatározására még nem elegendő, mivel két pont, a P és P' is teljesíti a megadott feltételeket.

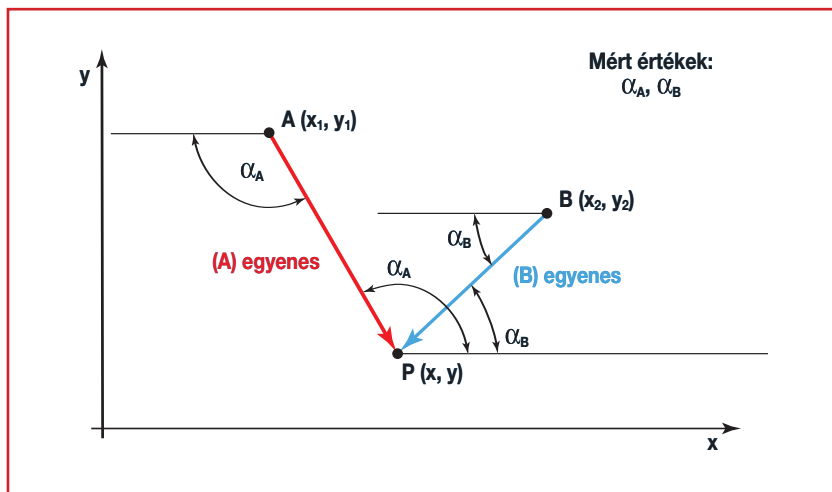
Természetesen a P pont azonosítható, ha ismerjük a pont távolságát egy harmadik ponttól, vagy ha van valami egyéb megkötés, például az, hogy a P pont valamilyen előírt görbén vagy annak környezetében helyezkedik el.

Illusztráció nélkül is elképzelhető, hogy ugyanezt a feladatot a háromdimenziós térben három ismert helyzetű ponttól mért távolság pontos ismeretében lehet megoldani.

Az iránymérésen alapuló helymeghatározás

Az iránymérésen alapuló mérési eljárás a geodézia leggyakrabban használt módszere a helyzet meghatározására. A feladatot a 3. ábra szemlélteti.

A helyzetünket jelölő P pontból mérjük az A és a B pont helyzetére jellemző irányszögeket, és ezek felhasználásával felrajzoljuk az A és B ponton keresztülhaladó, adott irányú (A) és (B) egyenest. A két egyenes metszéspontja kijelöli a P pont helyzetét.



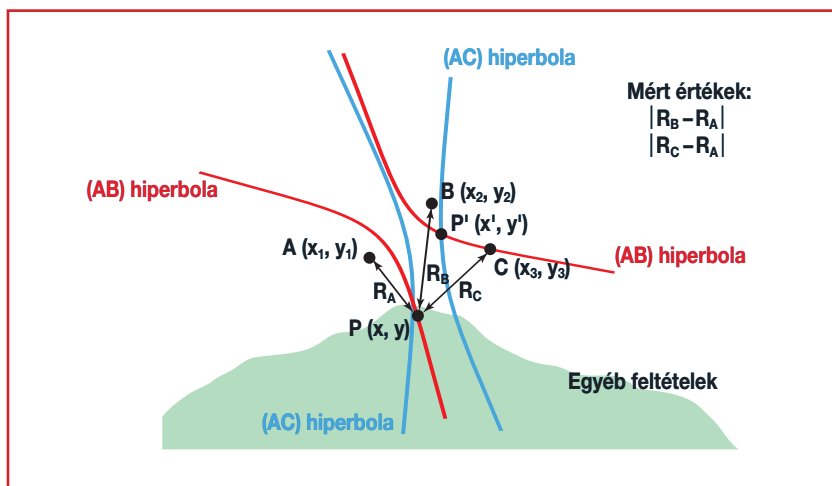
3. ábra. Iránymérésen alapuló helymeghatározás, ha a koordinátarendszerek irányjai ismertek

Három dimenzióban még egy irányadat mérésére szükség van a helyzet pontos meghatározásához. Például a vízszintes irányú szögek mérése mellett egy magassági szög méréssel a feladat megoldható. A helyzet meghatározásához ismernünk kell a referencia-koordináta-rendszer irányait.

A távolságkülönbség-mérésen alapuló (vagy hiperbolikus) helymeghatározás

Ebben az esetben csak arra vagyunk képesek, hogy a helyzetünket jelölő P pont és más ismert helyzetű pontok (például a síkon az A , B és C pontok) távolságának különbségét, az $|R_B - R_A|$ és $|R_C - R_A|$ értékeket határozzuk meg. A P pont koordinátáinak kiszámításához azon pontok mértani helyét kell megkeresnünk, amelyek távolságának a különbsége két ismert helyzetű ponttól adott. A középszkolai ismeretekből tudjuk, hogy ez a mértani hely a hiperbola.

A 4. ábrán az (AB) és (AC) hiperbolák azon pontok helyét határozzák meg a síkon, amelyek távolságának különbsége az aktuális pontoktól adott. A hiperbolák metszéspontjai kijelölik P pont lehetséges helyeit. A hiperbo-



4. ábra. A hiperbolikus helymeghatározás



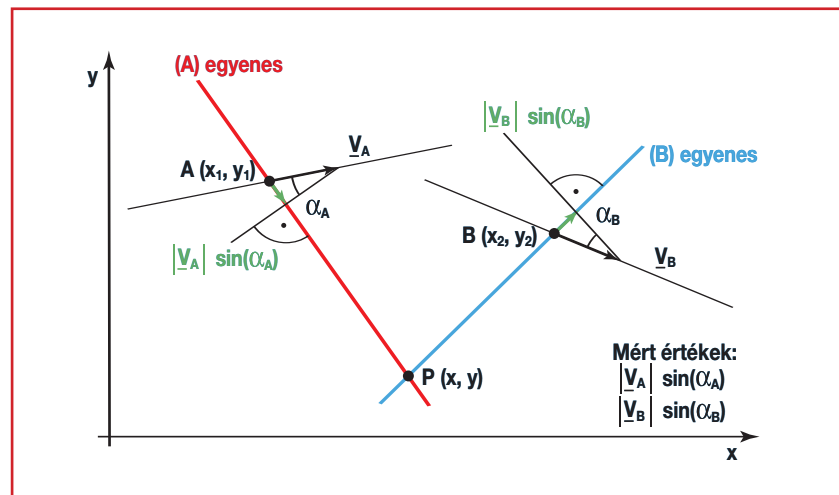
lák több ponton is metszhetik egymást, így a pontok közül a helyes megoldást csak egyéb adatok ismeretében lehet kiválasztani. Megjegyezzük, hogy ha csak a távolságok különbségének abszolút értékét ismerjük, akkor a hiperbolák mindkét ágát figyelembe kell venni, ahogy ezt az ábrán is megmutattuk; ha ismerjük a távolságok különbségének előjelét is, akkor elegendő a hiperbolák egyik ágával foglalkozni.

A háromdimenziós térben a helymeghatározáshoz még egy negyedik ismert helyzetű pontot is be kell vonni a mérésbe.

A sebességmérésen alapuló helymeghatározás, a Doppler-elven működő rendszer

Ebben az esetben mérőeszközeink arra képesek, hogy ismert helyzetű, és ismert irányban ismert sebességgel mozgó pontok (például a síkon az A és B pont), valamint a helyzetüket jelölő P pont relatív mozgási sebességét érzékeljék. Ennek alapján a P pont helyzete pontosan meghatározható.

5. ábra. Doppler-mérésen alapuló helymeghatározás



Az 5. ábrán a v_A és v_B az A és B sebességét és mozgási irányát mutatja, eszközeink pedig azt képesek mérni, hogy az A és B pontok a P ponthoz viszonyítva milyen sebességgel mozognak. Mindez azt jelenti, hogy mérni tudjuk az ábrán bejelölt α_A és α_B szögeket.

Az ábrából világosan látszik, hogy az A és B pont helyzetének és az α_A és α_B szögeknek az ismeretében az (A) és (B) egyenesek megszerkeszthetők, és ezen egyenesek metszéspontja kijelöli a P pont helyzetét.

Rádiós rendszerekben két pont egymáshoz mért relatív sebességét az ún. Doppler-elv alapján lehet meghatározni: ismert ugyanis az a fizikai jelenség, hogy hullámok (hang- vagy rádióhullámok) kisugárzása esetén – ha az adó- és vevőegységek egymáshoz képest (radiális irányban) mozognak – a rezgési frekvencia (hangmagasság) a sebességgel arányosan megváltozik. Ennek mérése teszi lehetővé az 5. ábrán jelölt irányszögek meghatározását. Három dimenzióban itt is egy méréssel többre van szükség.

Doppler-jelenség:

valamely hang- vagy fényforrás mozgásakor az egy másodperc alatt észrevehető rezgések száma kisebb, mint a nyugvó hang vagy fényforrás esetében, ha a rezgő test az észlelőtől távolodik, ellenkező mozgáskor pedig nagyobb.

Technikai megoldások a műholdas globális helymeghatározó rendszer kifejlesztése előtt

Az alábbiakban a hagyományos helymeghatározó rendszerek részleteivel nem foglalkozunk, csak a műholdas globális helymeghatározó rendszer előzményeinek tekinthető rádiós módszereket mutatjuk be. Ilyenek a földfelszíni OMEGA, LORAN-C és a rádiós iránymérő rendszerek, valamint a műholdas TRANSIT-rendszer.

Az OMEGA-rendszert az amerikai haditengerészet navigációjának támogatására hozták létre az 1970-es évek elején. Teljes kiépítésben a rendszer nyolc **földi állomással** működött (Norvégia, Libéria, Reunion-sziget, Argentína, Ausztrália, Japán, Irak, Dakota és Hawaii) a 10,2–13,6 kHz frekvenciákon (22,1–29,4 km hullámhosszal). A rendszer a felhasználó helyzetét a hiperbolikus navigációs elv alapján mérte. A távolságok különbségét a különböző adóállomásokról beérkező jelek fázisai közötti különbségek mérésével határozta meg. A rendszer körülbelül 3,6–7,2 kilométer pontossággal tudta azonosítani az óceánokon közlekedő hajók helyzetét. Szolgáltatásait a Föld bármely pontján igénybe lehetett venni. Bár 1991-ben még 26 500 felhasználója volt, 1997 szeptemberében működését leállították.

A LORAN-C-rendszert a tengeri és a légi navigáció céljára építették ki. Működése az 1950-es évek elején indult meg, elsősorban a tengerparti navigáció támogatására. A rendszer szolgáltatásai – az azonos felépítésű orosz CSAJKA-rendszerrel együtt – elérhetőek voltak a Föld felszínének jelentős részén, Európában és Amerikában is igénybe vehették őket. A rendszer egyes alrendszerei (láncai) egy ún. mester- és 2–5 másodlagos adóállomásból épültek fel. A rendszer a 90–110 kHz-es frekvenciatartományban működött, az egyes adókban igen pontos **atomi órák** biztosították a szinkronitást. Az adó által kisugárzott impulzusok beérkezési ideje a vevőbe az adó és a vevő közötti távolságtól függ. A vevő az egyes adókból származó impulzusok beérkezési ideje közötti különbségeket mérte, és ennek alapján határozta meg a vevő és az egyes adók közötti távolság különbségét. Ezekből az adatokból a vevő a hiperbolikus navigáció elvét alkalmazva határozta meg a felhasználó földrajzi helyzetét. Az időkülönbség mérésén alapuló helymeghatározás pontossága tipikusan 500 méter volt, és a rendszer képes volt a felhasználó mozgási sebességének meghatározására is. Mivel a LORAN-C rendszer egyes adóállomásain igen pontos órákat helyeztek el, a rendszer arra is alkalmas volt, hogy a pontos időre vonatkozó információkat eljuttassa a felhasználókhoz (erre épült például a távközlési rendszer szinkronizációja). A rendszerhez 2000-ben világszerte 28 alrendszer (lánc) tartozott, a felhasználók száma pedig elérte az 1,3 milliót (ebből 82 százalék hajózási, 14 százalék civil repülési és 4 százalék civil földi közlekedési alkalmazás).

A *rádiós iránymérő rendszerek* a helymeghatározást iránymérés alapján végzik. A rádiós iránymérés alapelve a második világháború óta jól ismert,

Földi állomás:

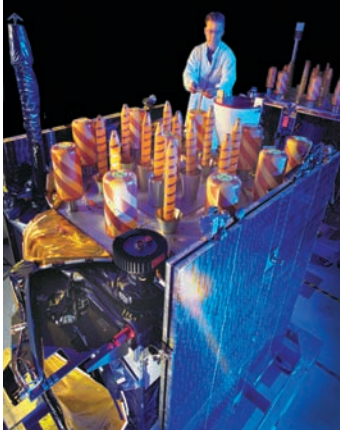
az aktív mesterséges holdakkal és egyéb űreszközökkel rendszeres kapcsolatot tartó berendezés, mely biztosítja az űreszközök rendeltetésszerű működését.

Hiperbolikus helymeghatározás:

az ismert helyzetű pontoktól mért távolságok különbségének mérésén alapuló helymeghatározó rendszer.

Atomi óra:

nagy pontosságú órajeleket előállító berendezés, amelynek a működése bizonyos igen stabil atomi rezonanciajelenségekre épül.



az adók irányát az irányított antennával felszerelt vevő az antenna elforgatásával (vagy az antenna iránykarakterisztikájának elforgatásával) képes meghatározni. A rendszer elsősorban a hajók part menti navigációját támogatja, az egyes adók úgy funkcionálnak, mint a világítótornyok, amelyek az ókortól kezdve segítettek a hajók part menti irányítását. A rádiós iránymérő rendszerek igen népszerűek, ma is körülbelül 200 adóállomás működik az Egyesült Államok partvidékén, hatótávolságuk eléri a 360 kilométert.

A TRANSIT-rendszer, a nagy pontosságú műholdas globális helymeghatározó rendszer első változata 1967-ben kezdte meg nyilvános szolgáltatásait. Eredetileg a tengeralattjárókról indítható ballisztikus rakéták irányítása céljából fejlesztették ki, de később elsősorban navigációs és geodéziai célokat szolgált. A rendszer összesen hat, 1100 km magasságban poláris pályán keringő műholdat használt, és a 150 és 400 MHz-es frekvenciatartományban működött. A vevő helyzetét a vevő és a műholdak relatív sebességének mérésével, azaz a Doppler-elv alkalmazásával határozta meg. A helyzet azonosításán kívül a rendszer alkalmas volt a felhasználó sebességének mérésére is. A TRANSIT-rendszer legnagyobb hátránya, hogy a műholdak viszonylag alacsony száma miatt a helymeghatározási szolgáltatás időben nem volt folytonos (a 80. szélességi körön 30 percet, az Egyenlítőn 110 percet kellett várni két mérés között). Az időbeli megszorítások miatt a rendszert elsősorban lassú járművek navigációjára és geodéziai vizsgálatokra használták. Mérési pontossága egy frekvencián 500 méter, két frekvencián 25 méter volt, de differenciálisan elérhette az egy-két métert is. A TRANSIT-rendszer tette lehetővé a Föld felszínének első globális felmérését. Bár a rendszer felhasználóinak száma 1991-ben 90 ezer volt, jelentőségét erősen csökkentette a műholdas globális helymeghatározó rendszer bevezetése, így 1999 decemberében szolgáltatásait megszüntették.

A műholdas globális helymeghatározó rendszer elvi működése



A műholdas globális helymeghatározó rendszer alapvető paramétereit 1973-ban az Amerikai Egyesült Államok katonai apparátusa határozta meg. Az első műhold fellövésére 1978-ban került sor, a rendszer szolgáltatásai hivatalosan 1995-ben indultak meg. A GPS-rendszer a felhasználó helyzetét távolságmérés alapján határozza meg. A működés alapfeltétele az idő igen pontos mérése és a Föld körüli pályán keringő műholdak helyzetének pontos ismerete. A technika és technológia fejlődése éppen a 20. század nyolcvanas–kilencvenes éveiben tette lehetővé, hogy e két feltételt egyszerre teljesíthessék.

A rendszer legfontosabb jellemzőit az alábbiakban foglalhatjuk össze:

) A GPS-rendszerben ismert helyzetű Föld körüli pályákon keringő műholdak jeleket sugároznak a Föld felszíne felé. A földi vevőkészülék

ezeknek a jeleknek a mérési adataiból, illetve az általuk szállított információk feldolgozásából meghatározza a saját helyzetét. A rendszer tehát aktív műholdakkal és passzív földi vevőkészülékekkel működik.

) A GPS-rendszer működéséhez feltétlenül szükséges, hogy a vevőkészülék antennája és a műholdak között ne legyen akadály (rádiós árnyékolás); ez azt jelenti, hogy beltéri helymeghatározásra a GPS-rendszer nem alkalmas.

) A GPS-rendszer működésének alapfeltétele az időmérés pontossága. Minden műholdon igen pontos cézium és rubídium atomórák találhatók, melyek abszolút pontossága eléri a 10^{-13} – 10^{-14} értéket. Ez azt jelenti, hogy egy ilyen pontosságú óra kb. 300 000–3 000 000 év alatt késik vagy siet egyetlen másodpercet.

A működés alapjai

A GPS-műholdak jele adatokat tartalmaz, melyek a vevőkészüléket tájékoztatják a műhold aktuális helyzetéről és a műholdon mérhető pontos időről. A rendszer minden műholdja szinkronizáltan működik, azaz óráik pontosan összehangoltak, és jeleiket is pontosan azonos időben küldik a vevő felé. A távolságot a vevő igen egyszerűen határozza meg. Méri a jel érkezési idejét, és – ismerve a jel startjának időpontját – a jelterjedési idő kiszámítása után a **fénysebesség** ismeretében meghatározza a műhold és a vevőkészülék távolságát az alábbi módon:

$$R_i = cT_i$$

ahol R_i a távolság, c a fénysebesség, T_i a terjedési idő.

A nagyságrendek érzékeltetéséhez számoljunk egy kicsit!

a) Legyen a műholdak távolsága a Föld felszínétől:

$$R_i = 24\,000\text{ km} = 24\,000\,000\text{ m.}$$

Tudjuk, hogy a fény sebessége vákuumban közelítőleg:

$$c = 300\,000\text{ km/s} = 300\,000\,000\text{ m/s.}$$

A tipikus terjedési idő ilyenkor:

$$T_i = \frac{R_i}{c} = \frac{24\,000\,000}{300\,000\,000} = 0,08\text{ s} = 80\text{ ms}$$

b) Számoljuk ki azt is, hogy mekkora időhiba tartozik például három méter mérési hibához!

$$\Delta T_i = \frac{\Delta R_i}{c} = \frac{3}{300\,000\,000} = 0,00000001\text{ s} = 10\text{ ns.}$$

Ez azt jelenti, hogy ha tízmilliárdod másodpercnyi hibát ejtünk az időmérésben, akkor ennek következtében a távolságokat csak három méter hibával tudjuk meghatározni.

Fénysebesség:

fizikai állandó, amely megadja a fény és egyéb elektromágneses hullámok terjedési sebességét a különböző anyagokban. Értéke vákuumban kb. 300 000 km/sec.



Űrszegmens:

a GPS-rendszer műholdjainak közös megnevezése.

Monitorállomás:

a GPS-rendszer földi megfigyelő állomása.

A rendszer felépítése

A GPS-rendszer három alapvető alrendszerből épül fel:

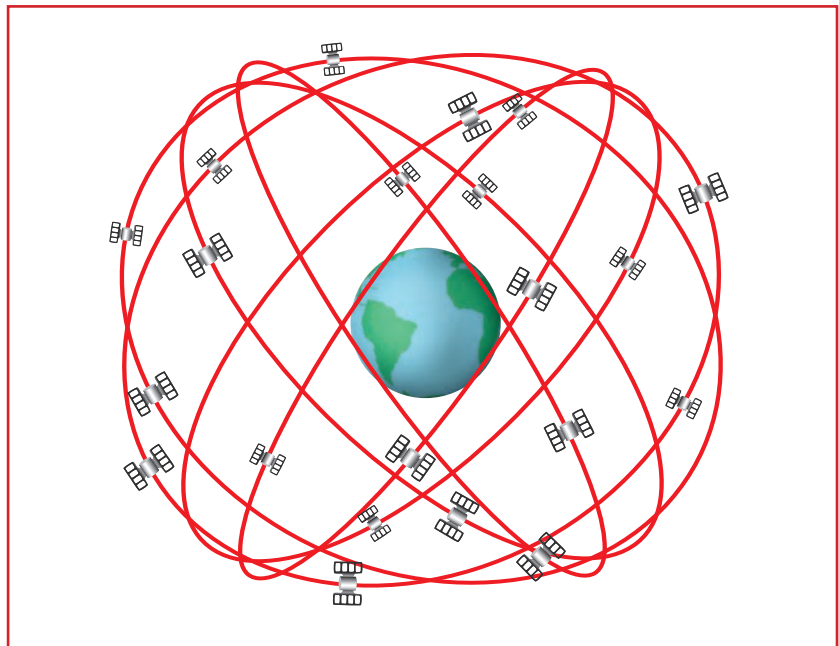
-) az **űrszegmens**ből (műholdak),
-) a felhasználói rendszerből (vevőkészülékek és szolgáltatások) és
-) a vezérlőrendszerből (földi vezérlő- és **monitorállomások**).

Ebben a fejezetben az űrszegmens és a vezérlőrendszer leírásával foglalkozunk.

Az űrszegmens felépítése

Az űrszegmens teljes kiépítésben 24 műholdat tartalmaz. A műholdak hat, az Egyenlítő síkjával 55° -os szöget bezáró, közel kör alakú pályán keringenek a Föld körül. A pályákat kelet–nyugati irányban 60° -os szögek választják el egymástól. A GPS műholdak konstellációját a 6. ábra mutatja.

6. ábra. A GPS-műholdak elhelyezkedése a Föld körül



A műholdak számát és elrendezését úgy választották meg, hogy minél nagyobb legyen annak esélye, hogy a Föld felszínén egy adott helyen legalább négy műholdat lehessen „látni” a vevőkészülék antennájával. Annak esélye, hogy egy felhasználó négynél kevesebb műholdat lát egy adott helyen egy adott időben, kb. 0,01 százalék, azaz ilyen eset minden tízezredik felhasználóval fordul csak elő, de néhány perces várakozás után ezek a felhasználók is képesek legalább négy műholdjelet venni.

A műhold főbb fedélzeti elemei az alábbiak:

-) adóberendezések és a hozzájuk tartozó antennák és modulátorok,
-) a pontos időt előállító atomi órák,
-) tápegységek és napelemek,
-) navigációs egység és fedélzeti számítógép,
-) helyzetstabilizáló elemek,

- › műholdközi kommunikációs egységek,
- › földi kommunikációs egységek.

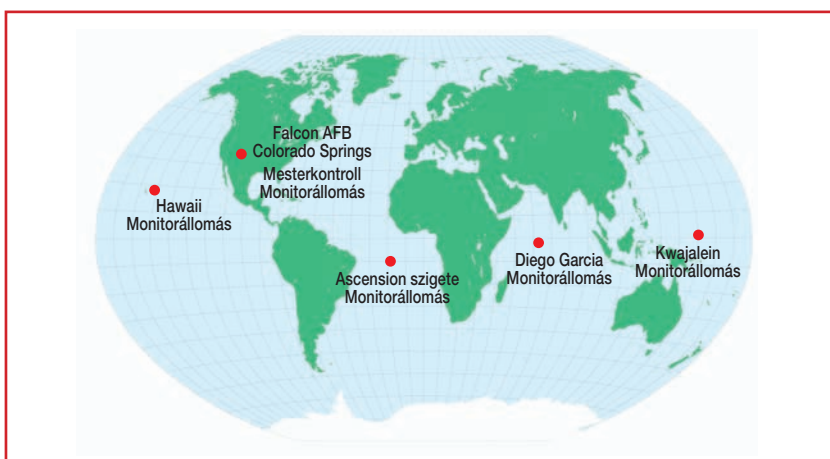
A műhold két tonna súlyú, a napelemek mérete 18 méter, a teljesítményfelvétel 2 kW, a műhold tervezett élettartama 15 év.

A vezérlőrendszer felépítése

A GPS-rendszer működését a földi vezérlőrendszer irányítja. A vezérlőrendszer három alapelemből áll:

- › központi vezérlőállomás,
- › monitorállomások,
- › földi antennák.

A vezérlőrendszer földrajzi elhelyezkedését a 7. ábra illusztrálja.



7. ábra. A GPS földi vezérlőrendszerének földrajzi elhelyezkedése

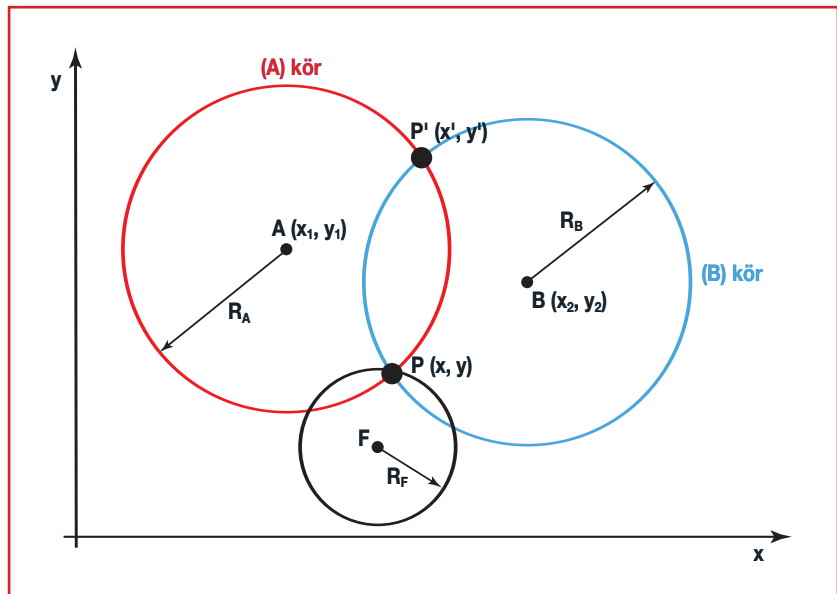
A földi vezérlőegység a következő feladatokat látja el:

- › a műholdak működésének folyamatos figyelése, az egyes egységek állapotának ellenőrzése;
- › a műholdak pályadatainak folyamatos mérése, a műholdon tárolt adatok frissítése;
- › a műhold fedélzeti óráinak szinkronizálása, a pontos idő beállítása;
- › a műholdon tárolt navigációs üzenettár frissítése, a helymeghatározáshoz szükséges korrekciós adatok (időjárás adatok, a légkör és az ionoszféra állapotjellemzői) gyűjtése és továbbítása a műholdak felé.

A földi állomások sűrűségének növelésével növelhető a GPS-rendszer pontossága (erről később lesz szó).

A helyzet meghatározásának módja

A GPS-rendszer a felhasználó helyzetét – a korábban már illusztrált módon – távolságmérés alapján határozza meg. Ideális esetben, amennyiben a műholdak és a felhasználói egység (vevőkészülék) órái pontosan együtt járnak, a távolságmérés az alábbi elvre épül: a vevőkészülék a műholdak által kül-



8. ábra. Távméremésen alapuló helymeghatározás. Az R_F sugarú kör a Föld felszínét jelképezi

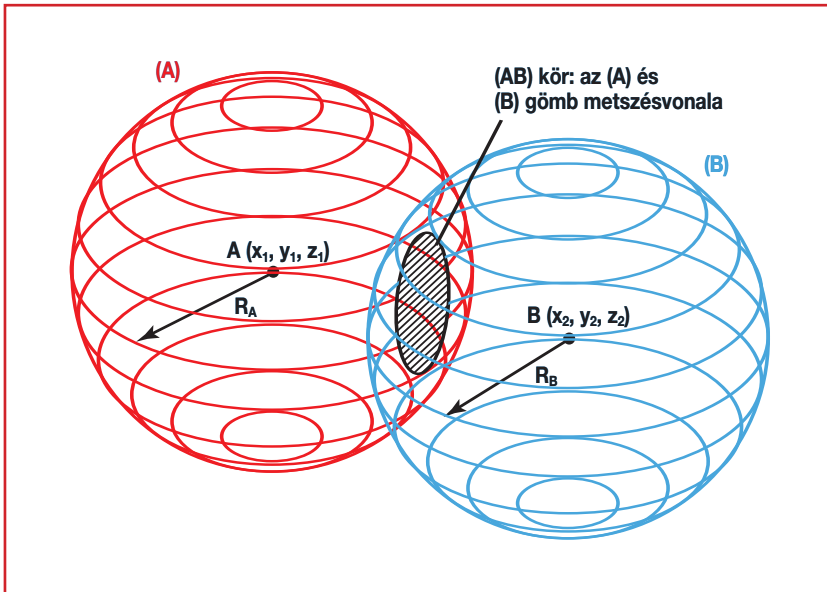
dött információk alapján ismeri a műholdak pontos helyzetét és a jelek elküldésének pontos időpontját. Mivel a jelek érkezési időpontját a vevő tudja mérni, a fénysebesség ismeretében a műholdak távolsága pontosan meghatározható. A távolságok kiszámítása (becslése) után a felhasználó helyzetét a műholdak helyzetét jelölő pontok köré írt gömbök metszéspontjának kiszámításával lehet meghatározni. A helymeghatározás ideális folyamatát a 8., 9. és 10. ábra szemlélteti.

Helymeghatározás két dimenzióban két mérés alapján

A 8. ábrából jól látható, hogy kétdimenziós esetben a P pont helyzete egyértelműen meghatározható oly módon, hogy az ismert helyzetű A és B pont körül megrajzoljuk az R_A és R_B sugarú (A) és (B) köröket és ezek két metszéspontja (P és P') közül azt választjuk ki, amelyik az F középpontú, R_F sugarú körön vagy annak közelében helyezkedik el. Az F pont köré rajzolt R_F sugarú kör esetünkben a Föld felszínét jelképezi.

Helymeghatározás három dimenzióban két mérés alapján

A 9. ábrán látszik, hogy az A és B pont körül felrajzolható R_A és R_B sugarú gömbök egy kör mentén metszik egymást. Az illusztráció alapján megállapíthatjuk, hogy két mérés biztosan nem elegendő a helyzet meghatározásához, mivel az (A) és (B) gömb metszési köre mentén végtelen sok olyan pont van, amely az A ponttól éppen R_A , a B ponttól pedig éppen R_B távolságra van. A pontos helymeghatározásához szükség van még egy mérésre.

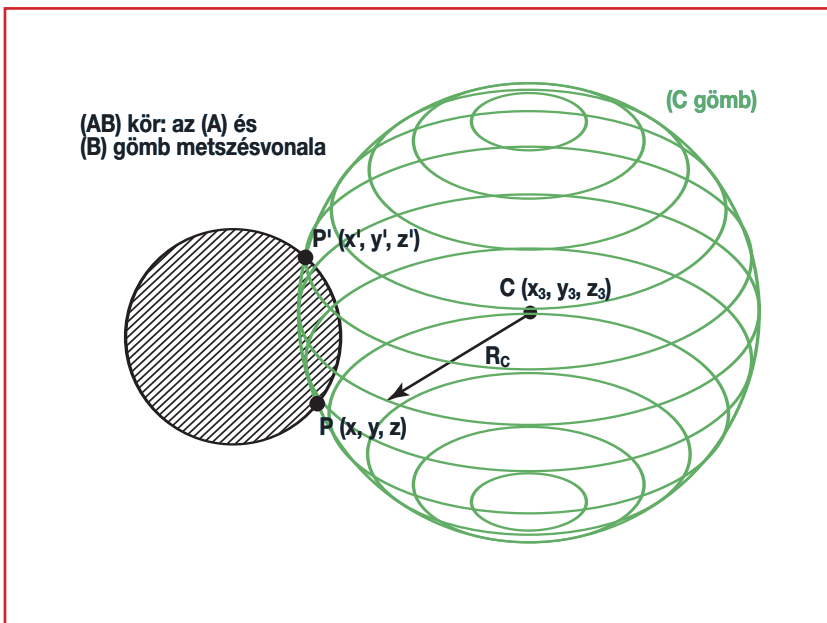


9. ábra. Háromdimenziós helymeghatározás két távolságmérés esetén

Helymeghatározás három dimenzióban három mérés alapján

A 10. ábra azt illusztrálja, hogy az (A, B) kör, az (A) és (B) gömbök metszésvonala két pontban (P és P') metszi a C középpontú, R_C sugarú (C) gömböt, ami alapján a P pont helyzete egyértelműen meghatározható, ha tudjuk, hogy a P pont például a Föld felszínének közelében található.

Mindezek alapján megállapítható, hogy ideális esetben, ha a műholdaknak és a felhasználó vevőkészülékének pontosan azonosan járó órái vannak, azaz pontosan ismerjük az R_i távolságokat, akkor egy időben három műhold jelének vétele elegendő a hely pontos meghatározásához.



10. ábra. Háromdimenziós helymeghatározás három távolságmérés esetén



A rendszerben alkalmazott jelek

Mint már említettük, a műholdas globális helymeghatározó rendszer aktív műholdakkal és passzív vevőkészülékekkel működik, azaz a jelek a rendszerben egy irányban terjednek, a műholdakról a vevőkészülékek felé. A műhold által kisugárzott jelek többféle feladatot látnak el: támogatják a távolság mérését, és információkat visznek át a műholdról a vevőkészülékekbe (például a műhold pályadatait, a pontos időt, a távolságmérés korrekciós adatait stb.).

A jelek frekvenciája

A GPS-rendszerben kétféle frekvenciájú (vivőfrekvenciájú) jelet használnak:

$$f_1 = 1575,42 \text{ MHz} = 1\,575\,420\,000 \text{ rezgés/másodperc,}$$

$$\text{hullámhossza: } \lambda_1 = 19 \text{ cm,}$$

$$f_2 = 1227,60 \text{ MHz} = 1\,227\,600\,000 \text{ rezgés/másodperc,}$$

$$\text{hullámhossza: } \lambda_2 = 24,4 \text{ cm.}$$

Hullámhossz:

az elektromágneses hullámok jellemző adata, az azonos hullámfázisú pontok térbeli távolsága.

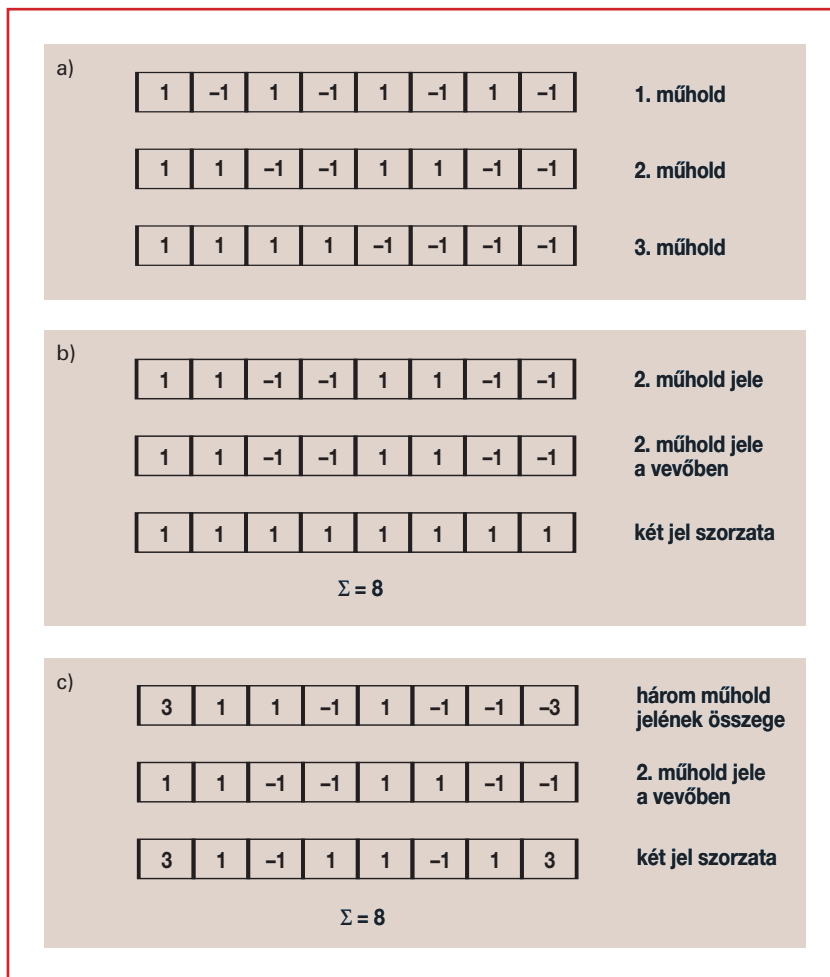
A két jel pontosan szinkronban van egymással, mindkettő egy közös alapjel felharmonikusa.

A párhuzamosan érkező jelek szétválasztása

A korábbiakban láttuk, hogy a vevőkészüléknek egyszerre több műhold jelét kell venni, mivel a helymeghatározáshoz több műhold távolságát kell egy időben mérni. Szokásos rádiós jelek alkalmazása esetén ugyanaz a vevő egy időben két vagy több jelet ugyanabban a frekvenciasávban nem tud venni, mivel a különböző forrásokból származó jelek zavarják egymást. Mindannyian tudjuk, hogy jó néhány évvel ezelőtt a Szabad Európa Rádió adásait szándékosan zavarták, ami azt jelentette, hogy a Szabad Európa Rádió által használt frekvenciasávban kisugárzott zavaró jelekkel képesek voltak meggátolni a sikeres vételt. Több műhold jelének egyidejű vétele esetén a GPS-rendszer vevőjében is fellépne ez a hatás, ha nem alkalmaznának olyan speciális eljárást, amely lehetővé teszi a különböző műholdakról érkező jelek szétválasztását. Ez az eljárás a kódosztásos többszörös hozzáférés, amelyben az egyes párhuzamosan érkező jeleket alkalmasan megválasztott kódok különböztetik meg egymástól. Az elv működését a 11. ábrán illusztráljuk egy példával.

A vevő detektorában ismerjük az egyes műholdak által alkalmazott kódok mintáit, és egy adott műhold jelét úgy mérjük, hogy a vevőbe érkező jelet megszorozzuk az adott műhold jelének mintájával, és az így kapott szorzatokat összeadjuk. Ezt az eljárást nevezzük korrelációs vételnek.

A 11. ábra tehát azt mutatja, hogy a detektorunk kimenetén mind a két esetben azonos eredményt kapunk. Vagyis ezzel a módszerrel az egyes forrásokból származó jeleket úgy tudjuk elválasztani egymástól, hogy egy-egy jelet a többitől teljesen függetlenül tudunk detektálni.



11. ábra. A korrelációs vétel. Az a) ábrán megadjuk az egyes műholdakon alkalmazott kódok mintáit. A b) ábrán azt vizsgáljuk, hogyan viselkedik ez a rendszer akkor, ha csak egyetlen műholdról érkezik jel, illetve a c) ábrán azt mutatjuk be, hogy mi történik akkor, ha a vevő bemenetére a három műhold jelének összege érkezik.

A GPS-rendszer kódjai

A GPS-rendszerben kétféle kódot használunk két különböző szolgáltatás támogatására.

A **C/A kód** a standard helymeghatározó szolgáltatást támogatja. A kód-elemek száma 1023, egy kódelem ideje 1 msec, ami körülbelül 300 m távolságnak felel meg. A C/A kódot elsősorban a civil alkalmazások használják, és érdemes megjegyezni, hogy az ezzel a kóddal támogatott szolgáltatások helymeghatározási pontosságát a GPS-rendszerben szándékosan – például az időzítés eltolásával vagy a kóddal együtt közölt pályaadatok hibás megadásával – csökkentették, hogy a pontos helymeghatározás lehetőségével csak az arra kijelölt felhasználók élhessenek. Ezt az ún. szelektív hozzáférési rendszert néhány éve megszüntették – éppen a GPS-rendszer civil alkalmazásainak és gazdasági jelentőségének a növekedése miatt.

A **P(Y) kód** a precíz helymeghatározási szolgáltatást támogatja. Itt a kódelemek száma szintén 1023, de egy kódelem időtartama csak 0,1 msec, ami körülbelül 30 méter távolságnak felel meg.

Az adatátvitel sebessége 50 bit/sec, ami 50 darab logikai 1 vagy 0 átvitelét jelent másodpercenként.

C/A kód:

árvéletlen jelekből álló kód, ismétlődési ideje: 1 ms; algoritmus a hozzáférhető, csak az L1 (1575,42 MHz) hordozófrekvenciát modulálja.

P(Y) kód:

árvéletlen jelekből álló kód, ismétlődési ideje egy hét; algoritmus titkos, az L1 (1575,42 MHz) és L2 (1227,60 MHz) hordozófrekvenciát is modulálja.

Távolságmérések a GPS-rendszerben

Már tudjuk, hogy a GPS-rendszerben a helyzet meghatározásához a műholdak távolságát, illetve a műholdakról érkező jelek terjedési idejét kell megmérni. Azt is tudjuk, hogy ideális esetben – amikor a műholdak és a felhasználói vevőkészülékek pontosan azonos időt mérnek vagy, ahogy szaknyelven mondjuk, az óráik pontosan szinkronban vannak egymással – a helyzet meghatározásához a kétdimenziós síkban két távolság, a háromdimenziós térben pedig három távolság mérésére van szükség. A több lehetséges helyzet közül még ekkor is ki kell választani a valódit, azaz a fentiekén kívül szükségünk van még egy közvetítő adatra, például arra, hogy a vevőkészülék (a felhasználó) a Föld felszíne közelében tartózkodik.

Sajnos a valóságos GPS-rendszerekben ezt az ideális helyzetet nehezen vagy csak nagyon nagy költségekkel lehet létrehozni, mivel a földi felhasználói vevőkészülékekben használt órák pontossága nem közelíti meg a műholdakon alkalmazott atomi órák pontosságát.

Vizsgáljuk meg, mi ennek a következménye! Hogyan lehet ezt az elvi problémát megoldani?

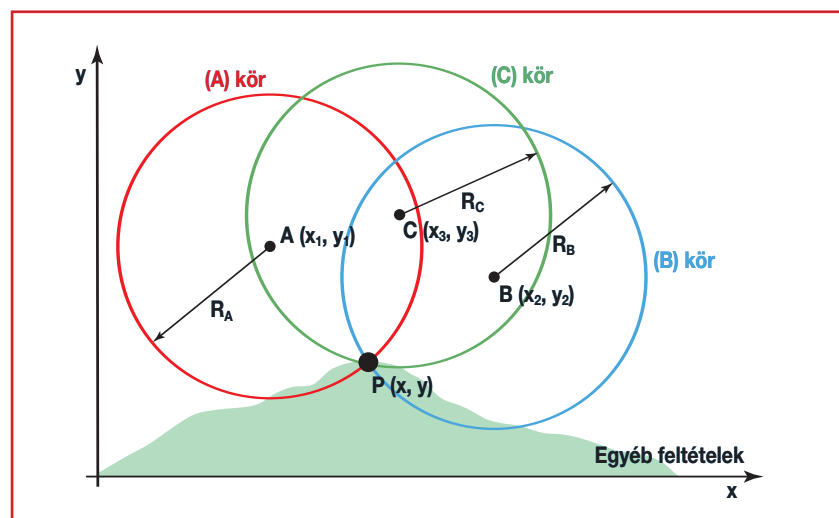
Pontos távolságmérés pontatlan órájú vevőkészülékkel

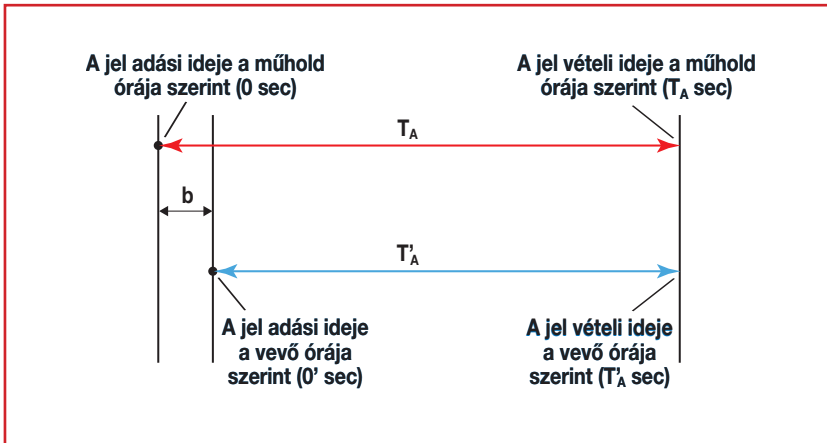
Először térjünk vissza a korábban tárgyalt ideális esethez.

A 12. ábrán jól látható, hogy a távolságok ideálisan pontos mérése esetén a P pont helyzetét két távolság, az R_A és az R_B mérése alapján meg tudjuk határozni, a harmadik mérésre (az R_C -re) nincsen szükség, hiszen a C pont körüli R_C sugarú (C) kör felrajzolásával új információhoz nem jutunk, a három kör ugyanis egy pontban metszi egymást.

Sajnos a vevőkészülék órájának pontatlansága az R_A , R_B és R_C pontos mérést lehetetlenné teszi, hiszen a távolság meghatározását a jel terjedési idejé-

12. ábra. A távolságmérésen alapuló helymeghatározás ideális esetben, három távolság mérésével





13. ábra. Az áltávolság fogalma: a vevőkészülék órája b idővel késik a műholdak óráihoz képest

nek mérésére vezetjük vissza, annak pontos meghatározása azonban ilyenkor lehetetlen. Mi is történik ekkor? A kérdésre a választ a 13. ábrán adjuk meg.

Az ábrából az alábbiakat állapíthatjuk meg:

› A műhold a saját (egyébként pontos) órája szerint a jelet a 0 időpontban indította el a vevőkészülék felé, és az éppen T_A idő után érkezett meg oda.

› A vevőkészülék a jel terjedési idejét úgy határozza meg, hogy megméri a saját órája szerinti $0'$ időpont és a jel vételének időpontja között eltelt T'_A időt.

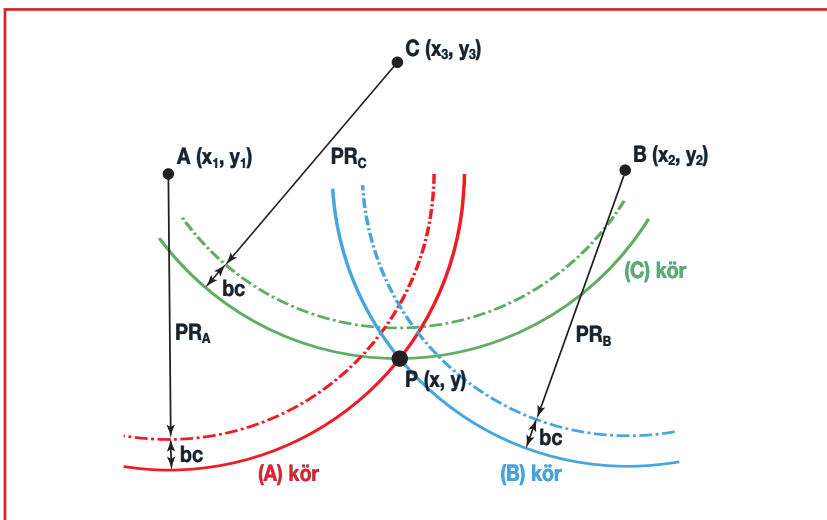
› Ha a vevőkészülék órája b értékkel késik a műholdak óráihoz képest, akkor a mérés eredménye $T'_A = T_A - b$ lesz, ami azt jelenti, hogy a vevő a valódi távolság helyett a $PR_A = c(T_A - b)$ ún. **áltávolság**ot képes csak meghatározni. Korábban láttuk, hogy 1 nsec (egy milliárdod másodperc) hibához 0,3 méter, 1 msec (egy milliomod másodperc) hibához pedig 300 méter távolsághiba tartozik, és nyilvánvaló, hogy ekkora időeltérés még pontos órák esetében is könnyen létrejöhet.

Nézzük meg, mi ennek a következménye!

A 14. ábrából jól látszik, hogy hibás mérés esetén az A , B és C pontok köré rajzolt PR_A , PR_B és PR_C sugarú körök nem egy pontban metszik egymást, így első lépésben a P pont helyzete nem határozható meg. Ezzel szem-

Áltávolság:

a GPS-rendszerben nem pontos órájú vevőkészülékkel mérhető távolság, emiatt a pontos helymeghatározáshoz legalább négy műhold jelére van szükség.



14. ábra. A helyzet meghatározása az áltávolságok (PR_A , PR_B és PR_C) felhasználásával



ben, ha minden mért átválsághoz hozzáadunk egy éppen cb nagyságú konstans értéket úgy, hogy a körök éppen egy pontban metsszék egymást, akkor a valódi (A), (B) és (C) kör felrajzolásával a P pont helyzetét, sőt a b késleltetési időértéket is képesek vagyunk meghatározni.

E vizsgálatból az következik, hogy hibás órák esetén a helyzet meghatározásához a síkban három, a térben pedig négy távolság mérésére van szükség. Ez annyit jelent, hogy a GPS-rendszerben a helyzet elegendően pontos meghatározásához a vevőkészüléknek legalább négy műhold jelét kell egy időben venni és feldolgozni, azaz legalább négy műholdnak kell a látóhatár felett tartózkodni az égbolton. Az elmondottakból az is egyenesen következik, hogy a GPS-rendszer mérni tudja a földi vevőkészülék órájának hibáját, a korábban említett b értéket, azaz képes arra is, hogy a Föld bármely pontján szolgáltatssa a pontos időt is.

A távolságmérés technikai lehetőségei

A korábban ismertetett elv szerint a távolságmérés alapját a jelek terjedési idejének mérése jelenti. Tudni kell azonban, hogy a GPS-jelek milyen paramétereinek a mérésével lehet a terjedési késleltetést pontosan meghatározni.

Az első lehetőség a GPS-rendszerben alkalmazott kód érkezési időpontjának becslése. Tudjuk, hogy a kódokat a helyileg tárolt kódmintákkal hasonlítjuk össze, és az egyes műholdak jeleit ezen az alapon különböztetjük meg egymástól. A jelek megkülönböztetése akkor hatékony, ha a helyileg előállított kódsorozat éppen azonos időben indul a műholdról a vevőkészülékbe érkező kódsorozattal, azaz akkor, ha a két jel szinkronban van egymással. Ilyenkor a műhold jelének érkezési időpontja éppen azonos a helyileg előállított kód minta indítási időpontjával, amely időpont mérése egyben a jel érkezési idejét is meghatározza.

Bár a mérés technikai részleteit itt nem tárgyaljuk, egyszerű megfontolásokkal következtetni tudunk a mérés pontosságának a korlátaira. A korábbiakból ismert, hogy a GPS-rendszerben kétféle kódot használnak, és a kódok egyes elemeinek időtartama a mérés pontosságát alapvetően befolyásolja. A standard helymeghatározást támogató C/A kódnál egy kódelem 300 méter távolságának, a precíz helymeghatározásban használt P(Y) kódnál egy kódelem 30 méter távolságnak felel meg. A **kódfázis** mérésén alapuló távolságmérés hibája tipikusan ezen értékek töredékrésze.

A második lehetőség a GPS-rendszerben alkalmazott vivőfrekvenciás jelek fázisának a mérése. A műholdról érkező jelek kezeléséhez és a műhold által küldött üzenetek vételéhez szükség van arra, hogy a vevőben előállítsuk a műholdról érkező vivőfrekvenciás szinuszos jel fázishelyes másolatát, azaz itt is szinkronizálásra van szükség. Ha ezt megteesszük, akkor pontosan meg tudjuk határozni a műholdról a vevőbe érkező jel fázisát. A fázis mérésével a távolságmérési hibát elvileg a hullámhossz törtrésze tudjuk lecsökkenteni, azaz elérhetjük a 20–25 centiméter törtrészenek megfelelő mérési pontosságot is. A baj csak az, hogy a vivőjel periodikusan érkezik, és a térben egy hullámhossznyi távolsággal továbblépve ugyanazt a fázisértéket kapjuk. Ez annyit jelent, hogy a **vivőfázis** mérésével az ab-

Kódfázis:

a periodikusan megismételt kódok teljes periódusidejének törtrésze.

Vivőfázis:

a rádiós rendszerek által használt hordozó jel fázisa.

szolút távolságot nem tudjuk meghatározni, viszont a távolság változtatásait igen pontosan mérni tudjuk. Ez teszi lehetővé azt, hogy a vivőfázis mérésével az egyszerű távolságmérés pontosságát növeljük, illetve a távolság időbeli változásának elemzésével a Doppler-alapú helymeghatározást támogassuk.

A pontosságot meghatározó tényezők

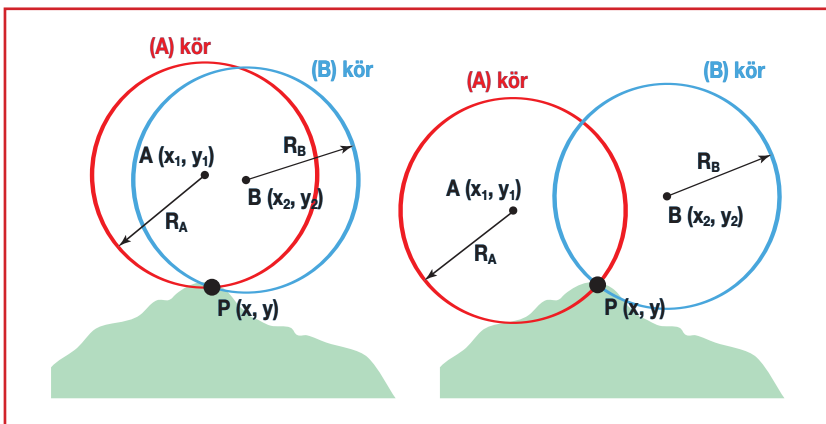
Mint korábban láttuk, a pontosság elsősorban a távolságmérés módszerétől függ, ezen kívül azonban több egyéb tényező is befolyásolja.

A műholdak elhelyezkedésének a hatása

A helymeghatározás szempontjából nem mindegy, hogy a vevő által látott műholdak az égbolton hol helyezkednek el. Vizsgáljuk meg a 15. ábrán két dimenzióban az alábbi két esetet:

- › azt, amikor két műhold igen közel van egymáshoz, és
- › azt, amikor a műholdak távol esnek egymástól.

A hibahatás érzékeltetésére nagyítsuk ki a P pont környezetét, és tételizzük fel, hogy az R_A távolságmérésnél ΔR_A hibát követünk el. A két esetben a helymeghatározás pontosságát a 16. ábráról lehet leolvasni.



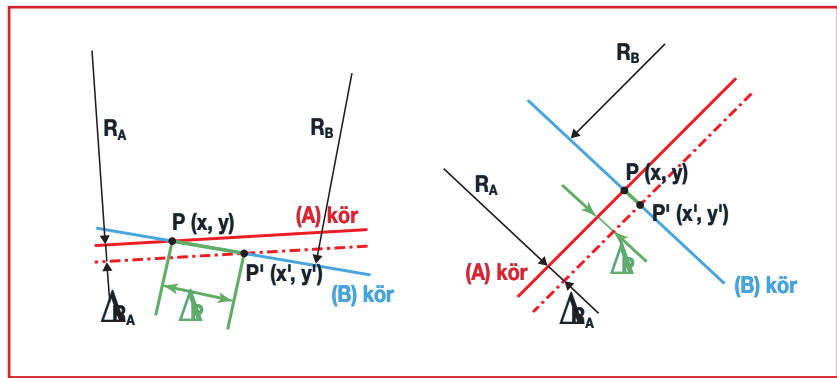
15. ábra. A műholdak relatív helyzetének két esete

Az ábrából jól látszik, hogy közeli műholdak esetén az (A) és (B) körök a P pontban igen kis szögben metszik egymást, így az R_A mérésében elkövetett ΔR_A hibánál jóval nagyobb ΔP helyzethibát kapunk. Ezzel szemben, ha a műholdak távol esnek egymástól, és a hozzájuk tartozó (A) és (B) körök a P pontban közel merőlegesen metszik egymást, akkor a ΔP helyzethiba lényegében azonos a ΔR_A távolságmérési hibával.

A kétdimenziós példa alapján a térbeli esetről általánosan a következő mondható el: akkor a legpontosabb a GPS-rendszer helymeghatározása, ha a négy szükséges műhold közül három a horizont közelében van – lényegében egyenletesen elosztva a horizont mentén –, egy pedig a zenit közelében található. A műholdak köré rajzolható gömbök ugyanis ekkor metszik egy-



16. ábra. A műholdak relatív helyzetének hatása a helymeghatározás pontosságára



mást a legkedvezőbbben. A távolságmérés és a helyzetmeghatározás hibájának viszonyát a **hibanövekedési szorzófaktor** adja meg, melyről elmondhatjuk, hogy például vízszintes irányú helymeghatározásnál az esetek 85 százalékában 1-nél, 99,9 százalékában pedig 2-nél kisebb. Hasonló adatokat ismerünk a függőleges irányú és a teljes helymeghatározási hibára vonatkozóan is.

A pontosságot befolyásoló egyéb tényezők

A GPS-rendszer pontosságát több egyéb tényező is befolyásolja. Ezek közül a legfontosabbak a következők:

-) a műholdak pályadatainak hibái;
-) a hullámterjedés sebességének változása – közismert tény, hogy a fénysebesség függ az aktuális közegtől, vákuumban más, mint egyéb anyagokban; tudjuk, hogy például a fénytörés jelensége is ezzel hozható kapcsolatba; a GPS-rendszerben a fény terjedési sebessége függ az **ionoszféra** állapotától (a töltött részecskék sűrűségétől) és a légkörben uralkodó aktuális viszonyoktól (hőmérséklet, nyomás, nedvességtartalom, egyéb jelenségek);
-) a többutas hullámterjedés;
-) a GPS-vevő környezete (árnyékolás, takarás);
-) a környezetben érzékelhető elektromágneses zajok.

Jegyezzük meg, hogy a földi vezérlőrendszer a helymeghatározás hibájának csökkentése végett gyűjti, és a műholdra továbbítja azokat az adatokat, amelyek a hibák korrigálására felhasználhatók. Néhány hibaokot (például az ionoszféra által okozott többletkésleltetés hatását) ki lehet küszöbölni azal is, hogy a méréseket párhuzamosan több különböző frekvencián végezzük el, mivel ez a hatás a frekvenciától ismert módon függ.

A GPS-rendszer pontossági adatai, a pontosság növelésének lehetőségei

A GPS-rendszer pontossági alapadatai a következők:

Vízszintes pontosság	15 m
Függőleges pontosság	25 m
Az időmérés pontossága	200 nsec

Hibanövekedési szorzófaktor:

a GPS-rendszer minőségi paramétere, amely megadja azt, hogy a távolságmérés hibájánál mennyivel nagyobb hibát követünk el a helymeghatározásnál.

Ionoszféra:

a Föld felszínétől 50–3000 km távolságban lévő változó vastagságú réteg, melyben a Nap aktivitásától és egyéb tényezőktől függően változó sűrűségű töltött részecskék találhatók.

A pontosság növelésére több lehetőség kínálkozik, ezek közül a legfontosabbakat ismertetjük:

› Növelhetjük a földi vezérlő- és monitorállomások számát, ami lehetővé teszi a pályaadatok pontosságának növelését, a hullámterjedéssel kapcsolatos korrekciós adatok pontosabb meghatározását, az időmérés precízebbé tételét.

› Növelhetjük a mérési frekvenciák számát – ez módot ad az ionoszféra által okozott hullámterjedési késleltetés pontos meghatározására.

› Fontos lehetőség a **differenciális helymeghatározási** elv alkalmazása, ami a helymeghatározás pontosságát azáltal növeli, hogy a felhasználó pozícióját egy ismert helyzetű referencia-vevőkészülék helyzetéhez viszonyítva határozza meg. A differenciális helymeghatározással – a módszer fontossága miatt – az alábbiakban részletesebben foglalkozunk.

A differenciális GPS (DGPS)-rendszer működése

A differenciális helymeghatározás alapelvét a 17. ábra mutatja be.

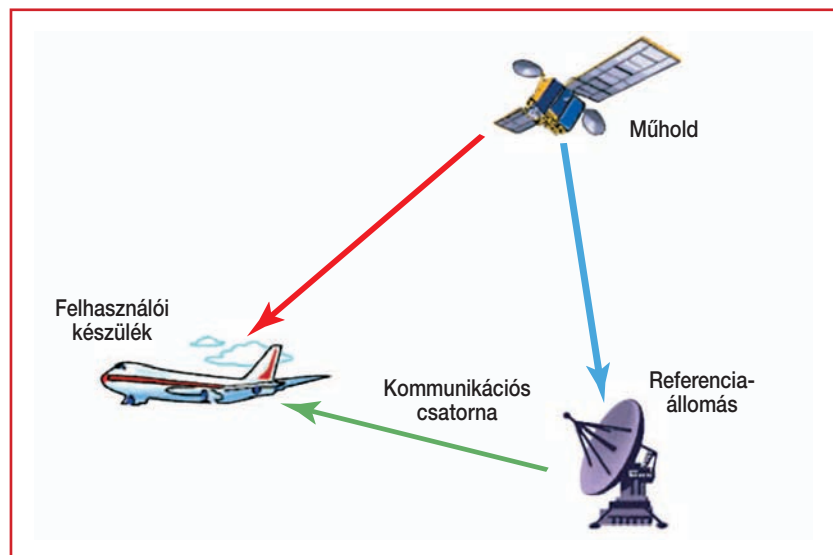
A rendszerben a referenciaállomás helyzete pontosan ismert, és mind a felhasználónál, mind pedig a referenciaállomáson működik egy-egy GPS-vevőkészülék. A vevők egy időben ugyanazoknak a műholdaknak a jelét veszik, és ennek alapján folyamatosan meghatározzák a helyzetüket. A referenciaállomás egy külön kommunikációs csatornán keresztül folyamatosan tájékoztatja az ismeretlen helyzetű felhasználót arról, hogy az általa aktuálisan mért helyzet mennyiben tér el a referenciaállomás ismert helyzetétől.

Ha igaz, hogy a mérési hibák egy része (a műholdak pályadatainak hibája, az ionoszféra és a légkör által okozott késleltetések, a műholdak óráinak hibája) mindkét vevőkészüléket azonos módon érinti, akkor az adatok cseréjével a hibák jelentős része kiküszöbölhető.

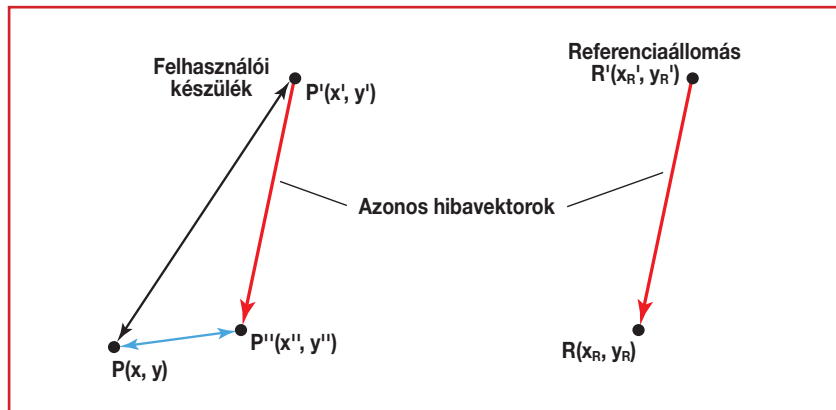
A differenciális mérés alkalmazásával a mérési pontosság egy nagyságrenddel növelhető.

Differenciális helymeghatározás:

olyan helymeghatározási módszer, ahol az adott objektum helyzetét más ismert helyzetű objektumokhoz viszonyítva határozzuk meg. A GPS-rendszerben ez a differenciális módszer a helymeghatározás pontosságát jelentősen növeli.



17. ábra. A lokális differenciális GPS-rendszer felépítése



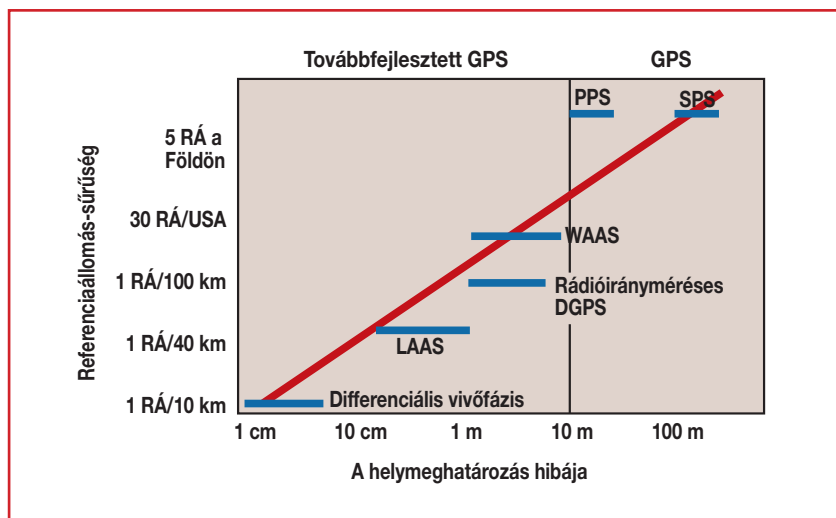
18. ábra. A differenciális GPS hibakorrektója

A 18. ábra a differenciális GPS-rendszerben alkalmazott hibakorrektóiót illusztrálja. A felhasználói készülék valódi helyzetét P , a mért helyzetét a P' , a referenciaállomás mért helyzetét az R' pont jelzi. Mivel a referenciaállomás pontos helyzete R ismert, a hibavektor meghatározható. Feltételezve, hogy a két mérés hibája azonos – ez természetesen csak közelítőleg igaz –, a referenciaállomás hibavektorával korrigáljuk a P' pont helyzetét. Az így kapott új P'' pont a felhasználó valódi helyzetét a P' pontnál jobban megközelíti. Tökéletes hibakorrektóió azért nem valósítható meg, mert a párhuzamosan végrehajtott mérések hibáinak egy részét egymástól független hatások okozzák. A mérési pontosság tovább növelhető a vivőfázis-alapú távolságmérés alkalmazásával (deciméteres pontosság) és a differenciális vivőfázis-alapú távolságméréssel (centiméteres pontosság).

A GPS-rendszer pontossági adatait a 19. ábra foglalja össze. Fontos megjegyezni, hogy az ábrán megadott PPS és SPS feliratok az eredeti GPS-rendszer katonai, illetve civil alkalmazásainak pontossági adatait jelzik. A korábban említett szelektív hozzáférési rendszer megszüntetése óta a civil alkalmazások pontossága eléri a PPS értékét.

Az ábrán a WAAS a nagy területet lefedő, az LAAS pedig a lokális repülésiirányításra használt differenciális GPS-szolgáltatásokat jelöli. Ezek a szolgáltatások a repülésiirányítás területén alkalmazhatók.

19. ábra. Összefoglaló adatok a GPS-rendszerek pontosságáról



Bár előadásunk a kérdéssel részletesen nem foglalkozott, de érdemes megemlíteni, hogy a GPS-vevőkészülékek arra is képesek, hogy a Doppler-elv alkalmazásával a földi vevőkészülék aktuális sebességét is mérjék. A sebességmérés pontossága elérheti a néhány tized km/óra értéket is.

A helyzetadatok értelmezése, viszonyítási rendszerek

A helymeghatározás kulcskérdése a viszonyítási rendszer értelmezése, azaz annak a koordináta-rendszernek a rögzítése, amelyben a helyzetre vonatkozó adatokat megadjuk.

A GPS referencia-koordináta-rendszere

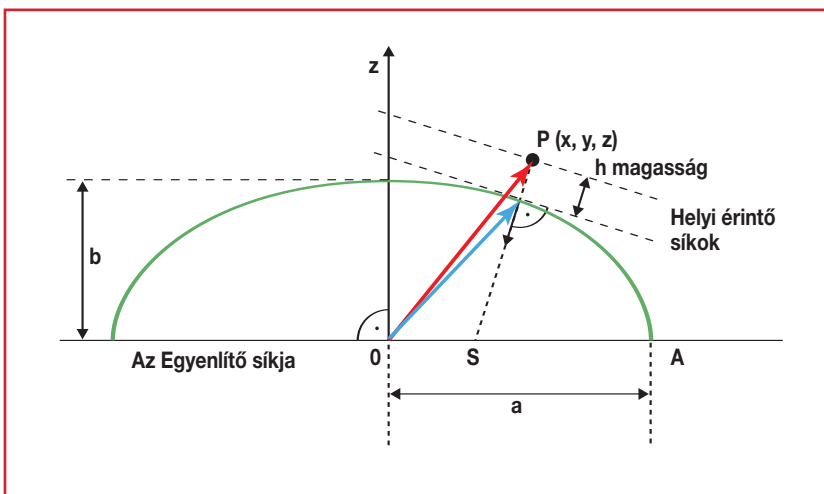
A GPS-rendszerben többféle koordináta-rendszert használnak.

A *Föld-középpontú inerciális rendszerben* az origó a Föld tömegközéppontjában van, az xy sík a Föld Egyenlítőjének síkjával esik egybe, a z tengely a Föld forgástengelye, és az x tengely valamilyen állandó csillagászati irányba, például a tavaszi napéjegyenlőség irányába mutat az égbolton. Ez a koordináta-rendszer nem veszi figyelembe a Föld tengely körüli forgását, és elsősorban a műholdpályák viszonyítási rendszereként használható.

A *Föld-középpontú Földhöz rögzített koordináta-rendszer* esetében az origó a Föld tömegközéppontja, az xy sík a Föld Egyenlítőjének síkjával esik egybe, a z tengely a Föld forgástengelye, és az x és y koordinátatengelyek a Földdel együtt forognak. Ebben a koordináta-rendszerben a szokásos földrajzi helyzet (hosszúság, szélesség, magasság) viszonylag egyszerűen meghatározható.

Forgásellipszoid:

olyan térbeli alakzat, amely egy síkbeli ellipszis egyik tengelye körüli körforgatásával hozható létre. A GPS-rendszer a Földet ilyen alakzattal modellezi.



20. ábra. A Föld forgásellipszoid modellje

A *WGS-84 rendszer* a Föld közelítő fizikai modellje. Lényege az, hogy a Föld alakját egy **forgásellipszoid**dal közelíti (20. ábra), melyben meghatározható a hosszúság, szélesség és magasság.

A WGS-84 modellben a Föld sugara az Egyenlítőnél

$$a = 6\,378\,137 \text{ méter,}$$

a sarkoknál, pedig

$$b = 6\,356\,752,3142 \text{ méter.}$$

Az ábrán a h értéke a P pont lokális magasságát adja meg a forgásellipszoid felszínéhez képest.

Egyéb adatok a GPS-rendszerben alkalmazott koordináta-rendszerekkel kapcsolatban



21. ábra. Turisztikai célú GPS-vevőkészülékek

A GPS-rendszer a felhasználó helyzetét egy háromdimenziós geocentrikus Descartes-féle koordináta-rendszerben határozza meg. A lokális helyzet-adatok kiszámításához további transzformációkra van szükség.

A Föld valódi alakja természetesen eltér a WGS-84 modellben használt forgásellipszoidtól. Gyakorlati megfontolások alapján a geodéziában és a térképészetben igen gyakran használják az ún. geoid-modellt a Föld alakjának pontosabb fizikai leírására. A geoid-modellben a Föld alakját olyan felülettel közelítjük, amelynek minden pontján azonos a gravitációs gyorsulás, a Föld gravitációs vonzásának az értéke. A modell használata azért terjedt el, mert a tengerek átlagos felszíne a geoid-modellt követi, a hagyományos térképészetben pedig a lokális magasságot a legközelebbi tenger átlagos szintjéhez viszonyították. Ez a magyarázata annak, hogy GPS-rendszerrel meghatározott Descartes-koordinátaadatokat nemcsak a WGS-84, hanem a geoid-modellbe is transzformálni szokták. Érdeemes megjegyezni, hogy a geoid-modell meglehetősen szabálytalan, zárt matematikai formulákkal nem írható le.

A GPS-rendszer tipikus alkalmazásai



22. ábra. Gépjárművekben használt készülék

A globális műholdas helymeghatározás alkalmazási köre az elmúlt évtizedben rohamosan bővült. Sorra jelentek meg az új szolgáltatások, és a kereskedelemben feltűnően bővült az őket támogató hardver- és szoftvereszközök kínálata. A következőkben ismertetjük a GPS legjellemzőbb felhasználási területeit, a szolgáltatások típusa és a szükséges helymeghatározási pontosság alapján csoportosítva őket.

Egyszerű szolgáltatások, olcsó, kevésbé pontos helymeghatározó rendszerek

A szabadidő eltöltésének egyik kellemes módja a természetjárás, a kirándulás. Az egyszerű, *hordozható kézi vevők* könnyebbé teszik a tájékozódást a legvadregényesebb környezetben is (21. ábra).

A GPS-rendszer talán legfontosabb alkalmazási területe a *járművek hely-*

zetének meghatározása, a tengeri, földi és légi navigáció támogatása. A GPS-rendszert ebben az alkalmazási körben igen sokféle célra használják. Alapvető szerepet játszik például a gépjárművek földfelszíni navigációjában: a jármű helyzetének meghatározásában, a dinamikus útválasztásban, a baleseti helyzetek elkerülésében, az automatikus forgalomirányításban és az ellopott járművek felderítésében.

A rendszer egyaránt támogatja a *civil* és a *katonai alkalmazásokat*, az egyedi és a csoportos (üzleti) felhasználókat. A gépjárművek helymeghatározására a GPS-rendszerrel együtt alkalmazzák a klasszikus érzékelőket (például giroszkópokat, távolságmérőket, mágneses iránytűket, dőlésszög-érzékelőket és digitális térképeket) is (22. ábra).

További fontos felhasználási területet jelent a *tengeri navigáció*, a sporthajók és professzionális célú vízi járművek irányításának támogatása. Itt a GPS-rendszert elsősorban arra használják, hogy változatos időjárási viszonyok között, bármely napszakban képes legyen a legénység a hajót a kikötő közelébe irányítani úgy, hogy elkerüljék a veszélyes partszakaszokat és a tengeri baleseteket (23. ábra).

Az olcsóbb szolgáltatások közé tartozik az *egyszerű légi navigáció*, a repülőgépek helyzetének meghatározása, a repülőterek megközelítésének támogatása. Az egyszerűbb GPS-rendszereket elsősorban arra lehet használni, hogy a landolás előkészítését segítsék. Ilyen egyszerűbb eszközök alkalmazása esetén a leszálláshoz mindenképpen szükség van a pilóta aktív közreműködésére (24. ábra).

Igényesebb alkalmazások, drágább, nagy pontosságú helymeghatározó rendszerek

A légi közlekedésben a repülőgépek helyzetének nagy pontosságú meghatározása, az automatikus leszállító rendszerek támogatása már a nagyobb pontosságot igénylő, drágább felhasználási területek közé tartozik. Itt a mérési pontosság mellett igen fontos az, hogy a helymeghatározás megbízható, időben folytonosan elérhető és a külső hatásokra (időjárás, véletlen hibák, ritka természeti jelenségek) érzéketlen legyen. Ezeket a szolgáltatásokat elsősorban a differenciális GPS-rendszer képes támogatni, erre a célra fejlesztették ki a már említett WAAS- és LAAS-rendszereket.

Az igényesebb felhasználás körébe tartoznak a geodéziai és térképészeti alkalmazások, a *térinformatikai rendszerek* létrehozásának támogatása. A GPS-rendszer hatékonyan segíti a hagyományos földmérési feladatok megoldását (telekfelmérés, építkezések helyének meghatározása, vonalas építmények helyének kijelölése), a térinformatikai rendszerek adatbázisainak feltöltését és a térképek készítését. (25. ábra)

A hagyományos földmérési feladatokon túl egyre nagyobb a gazdasági jelentősége annak, hogy pontos információink legyenek a különböző közművekről, olaj-, gáz-, víz-, villanyvezetékekről, távközlési hálózatokról, épületekről. Az ilyen nyilvántartások feltöltését hatékonyan segíti a nagy pontosságú GPS-rendszerek alkalmazása.



23. ábra. Tengeri navigációs készülék



24. ábra. Légi navigáció céljára szolgáló készülék



25. ábra. Térképészeti mérési feladatok támogatása GPS-rendszerrel

**Tektonikus tábla:**

a Föld kérgének nagy egybefüggő és egymáshoz képest mozgó egységei. A tektonikus táblák mozgása szoros kapcsolatban van a vulkánok aktivitásával és a földrengésekkel.

Néhány egyéb érdekes alkalmazás

A fenti alapvető alkalmazások mellett a GPS-rendszer többféle egyéb felhasználási lehetőséget kínál. Végezetül ezek közül sorolunk fel néhányat.

) A Föld felszínén bekövetkező lassú változások megfigyelése, a *tektonikus táblák* mozgásainak vizsgálata. A tektonikus táblák mozgásának elemzése lehetőséget biztosít a Föld korai korszakainak megismerésére, de arra is, hogy a földrengések okait jobban megértjük, és pontosabb földrengés-előrejelzéseket tudjunk készíteni.

) A katasztrófaelhárítás segítése, a szakszolgálatok (mentők, tűzoltók, rendőrség) pontosabb informálása, a bevetésirányító rendszer támogatása.

) Mezőgazdasági alkalmazások a termés hozam növelésére, például a műtrágya optimális területi elosztásával.

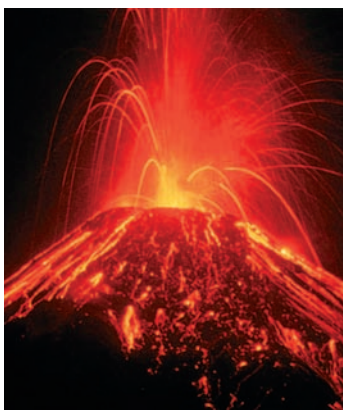
) A ritka, vadon élő élőlények viselkedési módjának tanulmányozása, az élőterek felmérése.

) A halrajok helyzetének meghatározása, a halászat hatékonyságának növelése.

) A Föld felszínén lezajló természeti jelenségek megfigyelése (árvizek, gleccserek, óceánok, erdők, atmoszféra, mocsarak stb.).

Ha visszaemlékszünk az előadás elejére, a vázlatos történeti áttekintésből kiderült, hogy az évszázadok folyamán a navigáció és a földmérés feladatai tulajdonképpen alig változtak. A földrajzi helyzet meghatározása, a telkek és utak kijelölése, a térképek készítése változatlanul szükséges, és erre a globális műholdas helymeghatározó rendszer minden korábbi módszernél jobban alkalmas. Az új technológia azonban a hagyományos feladatokon túl igen sok új szolgáltatás támogatását is lehetővé teszi.

Korunk technikai fejlődése nap mint nap új csodákkal kápráztat el bennünket. Az előadásnak remélhetőleg sikerült megmutatnia, hogy e csodák között előkelő helyet foglal el a globális helymeghatározás ámulatba ejtő újdonságaival és egyre bővülő szolgáltatásaival.



Ajánlott irodalom

- Abbott, E. – Powell, D.:* Land-Vehicle Navigation Using GPS. *Proceedings of IEEE*, Vol. 87, No. 1., January 1999: 245–162.
- Almár Iván – Both Előd – Horváth András – Szabó Attila:* Úrtan. XIV. fejezet. (SH Atlasz). Bp.: Springer, 1996.
- Axelrad, P. – Behre, C. P.:* Satellite Attitude Determination Based on GPS Signal-to-Noise Ratio. *Proceedings of IEEE*, Vol. 87, No. 1., January 1999: 133–144.
- Bao-Yen Tsui, J.:* Fundamentals of Global Positioning System Receivers. A Software Approach, Inc. New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto: John Wiley & Sons, 2000.
- Braasch, M. S. – Van Dierendonck, A. J.:* GPS Receiver Architectures and Measurements. *Proceedings of IEEE*, Vol. 87, No. 1., January 1999: 48–64.
- Counselman, C. C.:* Multipath-Rejection GPS Antennas. *Proceedings of IEEE*, Vol. 87, No. 1., January 1999: 86–91.
- Drane, Chris – Rizos, Chris:* Positioning Systems in Intelligent Transportation Systems. Inc. Norwood: Artech House, 1998.
- Enge, Per:* Local Area Augmentation of GPS for Precise Approach of Aircraft. *Proceedings of IEEE*, Vol. 87, No. 1., January 1999: 111–132.
- Enge, Per – Misra, Pratap:* Scanning the Special Issue/Technology on the Global Positioning System. *Proceedings of IEEE*, Vol. 87, No. 1., January 1999: 1–15.
- Fisher, S. C. – Ghassemi, K.:* GPS IIF – The Next Generation. *Proceedings of IEEE*, Vol. 87, No. 1., January 1999: 24–47.
- Herring, T. A.:* Geodetic Applications of GPS. *Proceedings of IEEE*, Vol. 87, No. 1., January 1999: 92–110.
- Hofmann-Wellenhof, B. – Lichtenegger, H. – Collins, J.:* GPS Theory and Practice. Wien, New York: Springer-Verlag, 2001.
- Kaplan, E. D.:* Understanding GPS Principles and Applications. Inc. Norwood: Artech House, 1996.
- Leick, Alfred:* GPS Satellite Surveying. Inc. New York, Chichester, Toronto, Brisbane, Singapore: John Wiley & Sons, 1995.
- Lewandowski, W. – Azoubib, J. – Klepczynski, W. J.:* GPS: Primary Tool for Time Transfer. *Proceedings of IEEE*, Vol. 87, No. 1., January 1999: 163–172.
- Misra, P. – Burke, B. P. – Pratt, M. M.:* GPS Performance in Navigation. *Proceedings of IEEE*, Vol. 87, No. 1., January 1999: 65–86.
- Shaw, M. – Levin, P. – Martel, J.:* The DoD: Steward of a Global Information Resource, the Navstar Global Positioning System. *Proceedings of IEEE*, Vol. 87, No. 1., January 1999: 16–23.
- Teunissen, P. J. G. – Kleusberg, A.:* GPS for Geodesy. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1996 and 1998.

