

14. előadás:

## **A GNSS alkalmazási területei: mérnöki, geofizikai, aeronómiai és meteorológiai alkalmazások**

Mint már korábban említettük, a helymeghatározás automatizálása számos mérnöki felhasználás számára is megnyitotta a GNSS mérések alkalmazásának lehetőségét. A következőkben néhány ilyen alkalmazási lehetőséget tekintünk át.

### **14.1. Fotogrammetriai alkalmazások**

A légifényképezésben többféle célra használhatjuk a műholdas helymeghatározást:

- a földi illesztőpontok helyének (koordinátáinak) meghatározásához (ez tulajdonképpen a geodéziai felmérés módszereivel végrehajtható),
- a külső tájékozási elemek meghatározásához, illetve
- a légifényképező repülőgép navigációjához.

A műholdas helymeghatározás segítségével a külső tájékozási elemek meghatározásakor tulajdonképpen a vetítési centrum térbeli koordinátáinak, a repülés irányának a hossz tengely és a szárnyak irányában vett tengely vízszintes dőlésének a meghatározását értjük. Mivel ezeket a jellemzőket mozgás közben kell meghatározni (lehet valós időben vagy akár utófeldolgozással is), a valódi kinematikus mérések módszerét célszerű alkalmazni.

Ha csak a vetítési centrum koordinátáit szeretnénk meghatározni GNSS mérések alapján, akkor elegendő egyetlen GNSS antennát elhelyezni a repülőgép tetején. A GNSS antenna és az objektív főtájánál konstans távolsága ismeretében a repülőgép dőlésszögeinek valamint irányának felhasználásával az objektív főtájánál koordinátái számíthatók. A repülőgép dőlésszögei alatt ismét a hosszirányú-, és a keresztirányú dőlést, irány alatt pedig az inerciális navigációs rendszerrel meghatározott azimutot értjük.

Ha mind a hat tájékozási elemet műholdas helymeghatározással kívánjuk meghatározni, akkor három, nem egy egyenesben elhelyezkedő GNSS antennára van szükségünk, amely méréseiből a kamara helyzete és dőlésszögei is meghatározhatóak.

Mivel légifényképezés közben a repülőgépnek az előre meghatározott repülési tervnek megfelelően kell haladnia, ezért a repülőgép navigációját is segíthetjük műholdas helymeghatározással egyéb eszközökön túl. Itt jellemzően kód mérésen alapuló helymeghatározásról van szó esetleg valamilyen műholdas vagy földi kiegészítő rendszer által szolgáltatott differenciális korrekció felhasználásával.

A földi fotogrammetriai alkalmazások közül ki kell emelnünk az útfelmérő rendszerek alkalmazását, vagy a közelmúltban nagy népszerűségre szert tevő Google StreetView rendszert. Mindkét rendszerrel a mérőképek georeferálásához műholdas navigációs rendszereket is felhasználnak. A mérőjárművön elhelyezett GNSS antennák és egyéb kiegészítő rendszerek (inerciális navigációs rendszer, távolságmérő stb.) segítségével a mérőkocsi térbeli helyzetét és tájolását is meg tudjuk határozni, amelyek alapján a tájékozási elemek számíthatóak, így a mérőképek alapján térbeli modelleket alkothatunk.

### **14.2. Építőmérnöki alkalmazások**

Az építőmérnöki alkalmazások számos területe közül két alkalmazási lehetőséget kívánunk kiemelni. Az egyik a vízépítési gyakorlatban használatos mederfelmérő hajók

alkalmazása, a másik a főként földmunkák kivitelezésénél használatos gépvezérlések bemutatása.

#### 14.2.1. A műholdas helymeghatározás szerepe a folyók, tavak mederfelmérésében

A felmérés célja általában vizeink medrének felmérése, azaz a meder domborzatának meghatározása. Ehhez a mérőhajó mélységmérést hajt végre. A mélységmérés jellege alapján kétféle eljárást különböztethetünk meg.

Az egyszerűbb eljárással egy szonár segítségével mérjük a mérőhajó alatti víz mélységét. Ebben az esetben pontbeli mélységeket kapunk, így a szonárfej vízszintes és magassági helyzetének meghatározásával egyszerűen számíthatjuk a mederpont háromdimenziós koordinátáit. Egyes GNSS kezelőszoftverek már képesek szonáradatok fogadására is, így tulajdonképpen egy terepi kezelő segítségével már eleve a mederfenék pontjainak koordinátáit rögzíthetjük. Mivel mind a GNSS vevők, mind a szonárok képesek ún. NMEA szabványos üzenetek formájában szolgáltatni az antenna pozícióját és a meder mélységét, így egy nagyon egyszerű szoftver segítségével akár magunk is előállíthatunk ilyen mederfelmérő hajót.

A másik sokkal komplikáltabb, de egyben fejlettebb megoldás a mederszkennerek alkalmazása. A mederszkennerek a hajó hossz tengelyére merőlegesen sávosan haladva tapogatja le a medret. Ez a szkennerek is a visszavert hanghullámok terjedési idejéből számítja ki a meder mélységét, a különbség azonban az, hogy nem egyetlen pont mélységét, hanem a hajó hossz tengelyére merőlegesen a víz mélységétől függő szélességben egy metszetet határoz meg. Mivel a hajó hossz tengelye és haladási iránya – különösen folyóvizeken – nem egyezik meg, ezért a GNSS méréseken felül egy giroszkóp segítségével a hajó hossz tengelyének irányát is meghatározzuk. A szkennerek vízszintes és magassági koordinátái tehát GNSS mérésekből, míg a letapogatás iránya a giroszkópos mérésekből származó azimut segítségével határozható meg. Így minden letapogatott pont térbeli helyzete meghatározható.

A szkennerek általában hatékonyabb eszközök a mederfelmérés végrehajtására, ugyanakkor a konkrét feladat megoldásához a mérőfelszerelés árát is figyelembe véve az egyszerűbb szonáros mederfelmérés is számos kisebb területű felmérés esetén gazdaságosan alkalmazható.

#### 14.2.2. Földmunkagépek vezérlése

A földmunkák, nyomvonalas létesítmények tervezése során az elmúlt évtizedekben előtérbe kerültek a háromdimenziós tervezést lehetővé tevő tervezőrendszerek. Ennek eredményeképpen a kiviteli tervek alapján történő kivitűzéseknél már nem csak hossz-, és keresztmetszelvényekre, hanem akár a megépítendő földmunka háromdimenziós térmodelljére is támaszkodhatunk.

Ennek következtében a földmunkák elvégzése során egyre kevésbé kell a geodéziai kivitűzésre támaszkodnunk. A műholdas navigációs rendszereken alapuló munkagépvezérlések lehetővé teszik, hogy a munkagépeket a megépítendő létesítmény nyomvonalán navigáljuk, míg azok tolólapjai magasságát a vezérlésbe feltöltött térmodell alapján automatikusan beállítsuk.

Az egyszerűbb gépvezérlések (pl. dózerek) esetén munkagép tolólapjának emelőszerkezetére kerül egy antennatartó rúd és RTK helymeghatározás segítségével folyamatosan másodpercenként akár 10-20-szor is meghatározzuk a tolólap alsó élének „van” magasságát és közepének vízszintes pozícióját. Két egymást követő mérés alapján pedig a munkagép haladási iránya is kiszámítható. Mivel ismerjük a tolólap háromdimenziós koordinátáit, így a földmunka térbeli modelljéből meghatározható a földmunka koronaszint

„kell” magassága. A „kell” és a „van” magasságok különbségeként kiszámítható, hogy mennyit kell emelni/süllyeszteni a tolólapon, amely módosítást a gépvezérlés a munkagép hidraulikus rendszerei segítségével automatikusan végre is hajt.

Bonyolultabb gépvezérlést igényelnek a gréderek. Ebben az esetben ugyanis a tolólap nem csak emelhető és süllyeszthető, hanem forgatható és oldalirányban dönthető is annak érdekében, hogy a földmunka koronájának keresztirányú lejtését ki lehessen alakítani. Ebben az esetben már nem elegendő csupán a GNSS vevők alkalmazása. A rendszert kiegészítik forgásérzékelőkkel és dőlésérzékelőkkel is. A munkagépvezérlés üzembehelyezését követően GNSS mérésekkel meghatározza a vezérlés a tolólap külső élének pozícióját. A vezérlésben be kell állítanunk, hogy a munkagép a munka megkezdése előtt a csökkenő vagy a növekvő szelvények irányában áll-e, mivel ennek megfelelően kell majd a tolólap keresztirányú dőlését a vezérlésnek beállítania.

A forgásérzékelő adatainak felhasználásával a vezérlés kiszámítja a tolólap vízszintes koordinátáit, a tolólap dőlésének mértékéből pedig a magassági koordinátákat. Ezek alapján a földmunka háromdimenziós modelljéből a tolólap „kell” magassága és a „kell” dőlésszöge meghatározható a gréder aktuális helyzetére, amit a gépvezérlés be is állít. Mivel ezeket a méréseket akár 10-20 Hz-enként is elvégzi a vezérlés, a munkagép haladása közben automatikusan be tudja állítani a megfelelő paramétereket, így a földmunka geometriailag pontos és gyors kivitelezése biztosítható.

Megjegyezzük, hogy sok esetben már a földmunka finomtükreinek kialakításához sem elegendő az RTK technika által biztosított 2-4 cm-es magasságmeghatározási pontosság. Emiatt ebben az esetben a munkagépek pozíciómeghatározását vagy robotmérőállomással vagy pedig az ún. mmGPS technológiával végezhetjük el.

A mmGPS technológia lényege, hogy a GPS méréseket kizárólag a tolólap vízszintes koordinátáinak meghatározására használjuk. Magassági értelemű meghatározáshoz egy az építési területen a gréder közelében felállított forgólézer jeleit használjuk. Így egyidőben biztosítható a kellően pontos vízszintes és magassági helymeghatározás anélkül, hogy valamivel több felhasználói ismeretet igénylő mérőállomást kellene használnunk a munkaterületen.

### 14.3. Aeronómiai alkalmazások

Az aeronómia a felső légkör fizikai és kémiai folyamataival foglalkozó tudomány. A műholdas helymeghatározási technika – köszönhetően annak, hogy az ionoszféra a jelek terjedési sebességét módosítja – felhasználható az ionoszféra szabad elektrontartalmának meghatározására.

A feladat meghatározásához állítsuk elő a  $k$  pontban a  $j$  műholdra két frekvencián végzett fázis és kódmérések különbségeit a következő alakban:

$$\Phi_{k,L2}^j(t_i) - \Phi_{k,L1}^j(t_i) = c(\tau^j - \tau_k) + (\lambda_{L2} N_{k,L2}^j - \lambda_{L1} N_{k,L1}^j) - \alpha I_f(t_i) + v_\Phi, \quad (14.1)$$

és

$$P_{k,L2}^j(t_i) - P_{k,L1}^j(t_i) = c(\tau^j - \tau_k) + \alpha I_f(t_i) + v_P \quad (14.2)$$

ahol  $\tau^j$  és  $\tau_k$  a vevő, illetve a műhold kivonás után visszamaradó szinkronizációs hibája,

$$\alpha = 40,3 \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} = 1,05 \cdot 10^{-17} [\text{m}^3] \quad (14.3)$$

$I_f(t_i)$  pedig a teljes elektrontartalom.

Mivel ebből a lineáris kombinációból kiesik a valódi távolság, ezért ezt „geometria-mentes” lineáris kombinációnak nevezzük. Az egyéb hibák, mint például az L1 és L2 antenna fáziscentrum ingadozások az antennamodellek segítségével megfelelően korrigálhatóak, viszont az órahibák különbségéből visszamaradó szinkronizációs hibák nem elhanyagolható mennyiségek.

A szinkronizációs hibák a műhold megfigyelési időtartama alatt konstans mennyiségek, így a (14.1) és (14.2) egyenletek összege csak véletlenszerű hibákat tartalmaz az ionoszféra okozta hatás kiejtése miatt:

$$\Delta_{GIF} = 2c(\tau^j - \tau_k) + (\lambda_{L2} N_{k,L2}^j - \lambda_{L1} N_{k,L1}^j) + v_\Phi \quad (14.4)$$

Ezt a lineáris kombinációt nevezzük geometria és ionoszféra mentes lineáris kombinációnak. Amennyiben az észlelés nem tartalmaz ciklusugrásokat, akkor a (14.4) képletből a  $\bar{\Delta}_{GIF}$  átlagérték meghatározható. Ezt az átlagértéket a (14.1) egyenletből kivonva az ionoszféricas közvetítőegyenlethez juthatunk:

$$\Phi_{k,L2}^j(t_i) - \Phi_{k,L1}^j(t_i) - \bar{\Delta}_{GIF} = -c(\tau^j - \tau_k) - \alpha I_f(t_i) + v_\Phi \quad (14.5)$$

A közvetítő egyenlet továbbra is tartalmazza a szinkronizációs hibát, amelyet a kiegyenlítés során kell meghatározunk. A kiegyenlítéshez át kell térnünk a vertikális elektrontartalomra:

$$I_f(t_i) = \frac{I_v(t_i)}{\sin E_i(t_i)}. \quad (14.6)$$

A vertikális elektrontartalmat az ionoszféricas ponthoz tartozó földrajzi szélesség és a helyi idő függvényében többnyire lineáris polinom segítségével modellezhetjük:

$$I_v(t_i) = I_{00} + I_{10}(\varphi - \varphi_0) + I_{20}(\vartheta - \vartheta_0). \quad (14.7)$$

Megjegyezzük, hogy előzetes állomáskoordinátákra szükségünk van, hiszen azok alapján számíthatjuk az ionoszféricas pontban a műhold magassági szögét. A (14.7) és (14.6) egyenletet a közvetítőegyenletbe behelyettesítve, legkisebb négyzetek módszerével az  $I_{00}$ ,  $I_{10}$  és  $I_{20}$  paraméterek, valamint a időszinkronizáció hibája  $(\tau^j - \tau_k)$  meghatározható. Az eredmények tükrében az adatfeldolgozás során levezethető elektrontartalom 1-4 TECU pontossággal jellemezhető.

Az ionoszféra okozta késleltetést több pontban is meghatározva és egy adott időtartamban blokkonként egy-egy átlagos TEC értéket kiszámítva izovonalas TEC térképek is készíthetőek.

Az ionoszféra állapotának egy másik vizsgálati módszere az rádió-okkultációs mérések felhasználása. Rádióokkultációs méréseket főként az alacsony földi pályán (LEO) keringő műholdakra szerelt GNSS vevőberendezések segítségével hajthatunk végre. A műholdak által sugárzott jelek az atmoszférában haladva nem csak sebességüket változtatják, hanem el is hajlanak. Emiatt az elhajlás miatt, a LEO műholdakra szerelt GNSS vevők a horizont alatt is észlelni tudják a GNSS műholdak jeleit. Az elhajlási szögből meghatározható az ionoszféra sebességmódosító hatása a felső légkör különböző szintjein, így gyakorlatilag egy elektrontartalom-profil tudunk felvenni, ami a felső légkör elektronsűrűségének a függőleges metszetét adja vissza. A taiwani-amerikai kooperációban fellőtt FORMOSAT/COSMIC LEO műholdkonstelláció célja, hogy Földünkön naponta nagy számban tudjunk előállítani ilyen rádióokkultációs méréseket, amelyek alapján nem csak a felső légkör állapota, hanem akár a troposzférában található vízgőztartalom is meghatározható.

## 14.4. Meteorológiai alkalmazás

A műholdas helymeghatározó rendszerek segítségével lehetőségünk nyílik a troposzféra okozta késleltető hatás számszerűsítésére. Ezt a hatást két részre bonthatjuk fel, a száraz légtömegek hatására, és a nedvességtől függő hatásra. A száraz légtömegek hatását földi meteorológiai adatok segítségével modellezhetjük, így a nedvességtől függő hatás meghatározható. A nedvességtől függő hatás ismeretében a troposzféra integrált vízgőztartalma – különféle modellek alapján – becsülhető. Ez a vízgőztartalom a kihullható csapadék felső korlátját adja meg, így fontos információkat biztosít az előrejelzésekhez használt numerikus modellek számára.

A GNSS adatok feldolgozása során lehetőségünk nyílik a troposzféra okozta késleltetés becsülésére. A teljes késleltetés meghatározása helyett a priori modellként a hidrosztatikus részt már figyelembe is vehetjük, így rögtön a „nedves” összetevőt (ZWD) is meghatározhatjuk. Az utóbbiból az alábbi eljárással becsülhetjük a troposzféra integrált vízgőztartalmát.

Az integrált vízgőztartalom ( $IWV$ ) definíciója szerint:

$$IWV = \int_{z_{ant}}^{z_{tfh}} \rho_v dz \quad (14.8)$$

ahol  $\rho_v$  a vízgőz sűrűsége.

Vezessük be a vízgőz átlagos hőmérsékletét ( $T_m$ ):

$$T_m = \frac{\int_{z_{ant}}^{z_{tfh}} \rho_v dz}{\int_{z_{ant}}^{z_{tfh}} \frac{\rho_v}{T} dz} \quad (14.9)$$

Ekkor nedves késleltetést leíró egyenletet az alábbi alakra hozhatjuk:

$$ZWD = 10^{-6} R_v \left( k_2 - \frac{R_d}{R_v} k_1 \right) IWV + 10^{-6} k_3 R_v \frac{IWV}{T_m} \quad (14.10)$$

amelyet átrendezve az alábbi összefüggést kapjuk:

$$IWV = \frac{10^6}{R_v \left( -\frac{R_d}{R_v} k_1 + k_2 + \frac{k_3}{T_m} \right)} ZWD. \quad (14.11)$$

A (14.11) egyenletből láthatjuk, hogy a ZWD értékekből csupán a vízgőz átlagos hőmérsékletétől ( $T_m$ ) függő  $Q(T_m)$  tényező ismeretére van szükségünk, ahol

$$Q(T_m) = \frac{10^6}{R_v \left( -\frac{R_d}{R_v} k_1 + k_2 + \frac{k_3}{T_m} \right)}. \quad (14.12)$$

$T_m$  értékre Bevis és társai több mint 9000 rádiószondás (ballonos) mérésből vezettek le egy lineáris összefüggést a földfelszíni hőmérséklet függvényében ( $T_f$ ):

$$T_m = 70,2 + 0,72T_f. \quad (14.13)$$

Mind a  $Q$ , mind a  $T_m$  tényezőkre többféle modell is létezik, kimutatható, hogy ezek a modellek regionális és szezonális változásokat is mutatnak.

A  $Q$  arányossági tényező reciprokára Emardson és Derks 38 európai állomásról származó, mintegy 120.000 rádiószondás mérésből vezetett le egy összefüggést, amely csak a felszíni hőmérséklettől függ:

$$\frac{1}{Q(T_f)} = a_0 + a_1(T_f - \bar{T}) + a_2(T_f - \bar{T})^2, \quad (14.14)$$

ahol  $a_0=6,458 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $a_1=-1,78 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{kg/K}$ ,  $a_3=-2,2 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg/K}$  és  $\bar{T}=283,49 \text{ K}$ .

Összefoglalva tehát a troposzféra nedves összetevőjének zenitirányú késleltetését a GNSS mérésekből meghatározhatjuk. Ezt a  $Q$  arányossági tényezővel átválthatjuk integrált vízgőztartalommá. Az arányossági tényező meghatározásához a mérési pontban meg kell határoznunk a felszíni hőmérsékletet is.