



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki Kar

Általános és Felsőgeodézia Tanszék

Nagy pontosságú abszolút GPS helymeghatározás és néhány alkalmazása

PhD értekezés tézisei

Tuchband Tamás

BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszék

Témavezető:

Dr. Rózsa Szabolcs

egyetemi docens

BME, Általános- és Felsőgeodézia Tanszék

Budapest, 2015.

Abszolút helymeghatározás elhelyezése

Geodéziai szempontból hazánk a leginkább fejlett nemzetek közé tartozik. Ez részben az évezred elején a FÖMI által kiépített aktív permanens hálózatnak is köszönhető. Ebből az okból kifolyólag Magyarországon a geodéziai pontosságú GNSS helymeghatározások terén a relatív módszer terjedt el, hiszen számos referencia pont áll rendelkezésre (permanens állomások, geodéziai alappontok). Kutatásomban a napjainkban fejlődő, nagy pontosságú abszolút műholdas helymeghatározás lehetőségeit vizsgálom, mely használatához nincs szükség ilyen mértékű GNSS infrastruktúrára. A módszer jelenleg a geodéziai alapokkal nem rendelkező országokban, tengereken és alacsony földi pályán keringő műholdak esetén versenytársa a relatív helymeghatározásnak.

A relatív helymeghatározás elterjedését a műholdjeleket terhelő hibák modellezésének hiányosságai segítették. A módszer a különbségképzésen alapszik, ahol is feltételezzük, hogy a különböző vevőkbe érkező jeleket a hatások ugyanakkora mértékben terhelik. Így a számításból egyszerűen kiejthető számos hibaforrás, köztük a műhold pálya- és órahibája, a műhold és vevő hardverkésései. Ezen felül – bizonyos esetekben – jelentősen csökkenthető az ionoszféra és a troposzféra okozta késleltetés is.

Amennyiben abszolút helymeghatározással geodéziai pontosságot kívánunk elérni, szükséges az imént említett hibák nagyságát pontosan ismerni, vagy azokat más módszerekkel kiejteni, hiszen ez esetben kizárólag a műholdakról érkező jelekre támaszkodhatunk. Fontos még az antennák fáziscentrum külpontosságának és vándorlásának ismerete is, hiszen a végeredmény pontosságát ezek is terhelik. A GNSS tudományág a nagy pontosságú abszolút műholdas helymeghatározást Precise Point Positioning-nak nevezi, így a dolgozatban erre az eljárásra a PPP elnevezéssel fogok hivatkozni.

A kutatás célja

A doktori értekezésemben sorra veszem az abszolút helymeghatározás neuralgikus pontjait, és hatásukat az elérhető pontosságra.

- Műhold pálya- és órahiba megoldások vizsgálata (Ultra Rapid, Rapid, Final - IGS)
- A PPP technika használatához szükséges észlelési idő meghatározása, tekintettel az elérhető pontosságra
- Ionoszféra hatása az egyfrekvenciás mérésekre, különböző ionoszféra modellek bevezetése a feldolgozásba
- Különböző troposzféra modellek vizsgálata, tekintettel az elérhető pontosságra és az extrém időjárási helyzetekben való megbízhatóságra
- Mozgó vevő koordinátáinak geodéziai pontosságú meghatározása utófeldolgozással, geodéziai alapokkal nem rendelkező területen

A vizsgálatokhoz a svájci Bernese v5.0 tudományos szoftvercsomagot alkalmaztam, ebben hoztam létre a vizsgálathoz szükséges szkripteket, melyek alapján lehetővé válik számos paraméter becslése, nem csak koordináták számítása, ami elsősorban a kommerciális szoftvereknél tapasztalható.

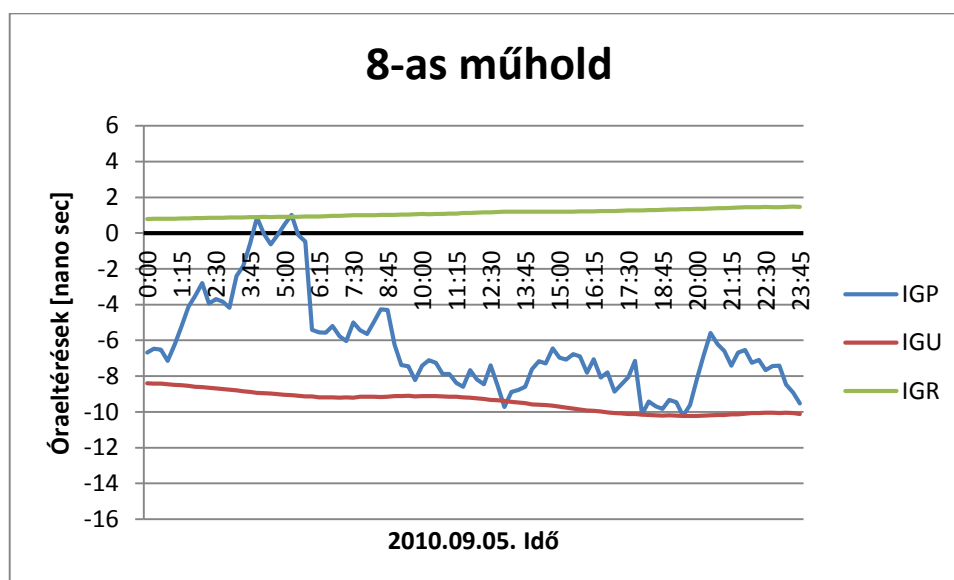
A felhasznált adatokat több helyről szereztem be:

- Nemzetközi GNSS Szolgálat (IGS) adatszolgáltató központjából a feldolgozott IGS és EUREF állomások mérési adatait, az előrejelzett (Ultra Rapid), gyors (Rapid) és precíz (Final) pálya- és órahiba megoldásokat, a földforgás paramétereit.
- A magyar permanens állomások mérési adatait a FÖMI KGO szolgáltatta.
- A permanens állomások adott epochára vonatkozó koordinátságait az ITRF, az EPNCB és a FÖMI KGO bocsátotta rendelkezésemre.
- Az antenna fáziscentrum külpontosságának (PCO) és vándorlásának (PCV) figyelembe vételéhez az amerikai NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) NGS (National Geodetic Survey) osztálya szolgáltatott kalibrációs adatokat.
- A troposzféra modellek vizsgálatához szükséges meteorológiai adatokat az OMSZ szolgáltatta.
- A feldolgozáshoz szükséges általános adatokat a berni egyetem biztosította a Bernese szoftverhez.

1. tézis

Különböző szempontok szerint megvizsgáltam az elérhető precíz pályák használhatóságának lehetőségeit. Megállapítottam, hogy az Ultra Rapid pályaadatok Final-tól való átlagosan 5 cm alatti eltérése kielégítő, azonban az órahibák 0,3-1,3 nano szekundumos (~10-40 cm-es) szórása már nem megfelelő a geodéziai pontosság eléréséhez. Rapid megoldás használata esetén mind pozíció, mind órahiba esetén 5 cm-nél kisebb eltéréseket tapasztaltam, azaz nem szükséges a jóval később publikált Final adatok kivárása a geodéziai pontosság eléréséhez. Az ehhez szükséges minimális észlelési idő megválasztására is végeztem vizsgálatokat. Az eredményeim alapján a geodéziai pontosság eléréséhez javasolt észlelési időtartam kettő óra, amennyiben méréseinket nem terhelik ciklusugrások. Ennél hosszabb észlelési idő megválasztásával a koordináták középhibája nem csökken tovább jelentősen, de a sikeres feldolgozásra ciklusugrás esetén is nagyobb esélyünk lehet.

A különböző pálya- és óramegoldások vizsgálatára 3 napi adatot, naponta ~2880 (~30 műhold/15 perc) értéket vizsgáltam meg.



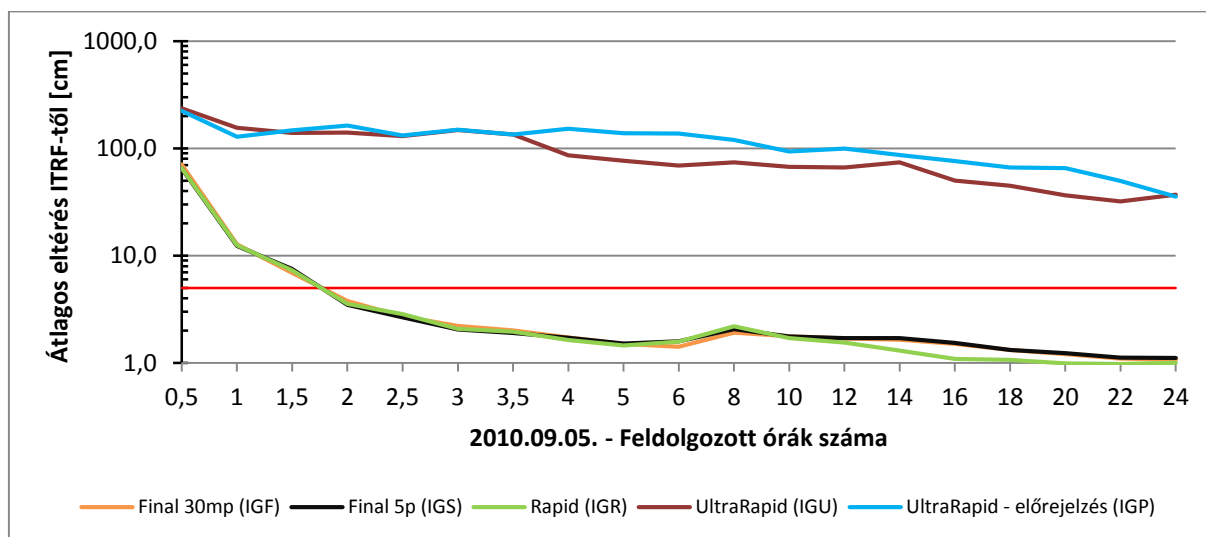
1. ábra Eltérések a precíz (Final) órahibától az adott napon

Az észlelés után a különböző megoldások más-más időpontokban válnak elérhetővé. A vizsgálatomban arra kerestem a választ, hogy meg kell-e várni a Final (kb. két hét várakozási idő) megoldásokat, vagy a Rapid (kb. 1 nap várakozási idő), illetve az Ultra Rapid (nincs vagy csupán néhány óra várakozási idő) is eredményesen használható? A Final órahibától való eltérés (egy műhold esetén mutatja az 1. ábra) nagysága helyett a változás mértéke a mérvadó, hiszen minél inkább véletlenszerűen változik, annál nagyobb pontatlanságot visz a feldolgozásba. Az eredmények szerint a Rapid pálya- és óramegoldások már megfelelő pontosságot mutatnak, így a precíz adatokra történő várakozási idő 12-18 napról, 17-41 órára csökkenthető.

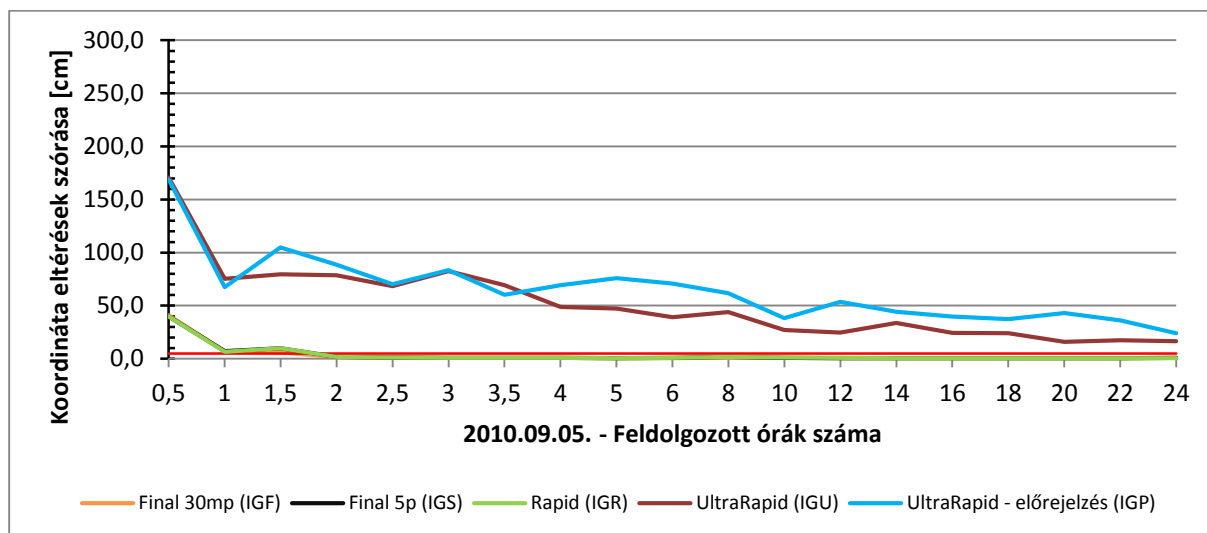
A szükséges észlelési idő meghatározásához európai permanens állomások napi adatait dolgoztam fel, különféle pálya- és órahiba adatokkal (Final (IGS és IGF), Rapid (IGR) és az Ultra

Rapid mindkét részét (IGU és IGP), 5 perces (IGS, IGR, IGU és IGP) illetve 30 másodperces (IGF) óraadatokkal). A 24 órás mérésekből kapott koordinátákat az ITRF megoldásához hasonlítottam. Az eltérések néhány milliméteres nagyságrendűeknek adódtak.

A 24 órás feldolgozás után az észlelések hosszát elkezdtem rövidíteni 24, 22, 20,...3, 2,5, 2, 1,5, 1, 0,5 órára. A kapott koordinátákat a napi feldolgozás eredményeihez hasonlítottam (2. ábra), illetve a koordináta-megoldások RMS hibáinak nagyságát is megvizsgáltam (3. ábra).



2. ábra Térbeli eltérések [cm] az ITRF megoldásához képest az egyes esetekben



3. ábra A koordináta eltérések szórása [cm] az észlelési idő függvényében az egyes esetekben

Az eredmények szerint 2 órás méréssel a geodéziai pontosság elérhető, az észlelési idő növelésével a pontosság nem nő jelentősen. Természetesen figyelembe kell venni azt a tényt, hogy ciklusugrás kiküszöbölésére hosszabb észlelési idő választásával nagyobb esélyünk nyílhat!

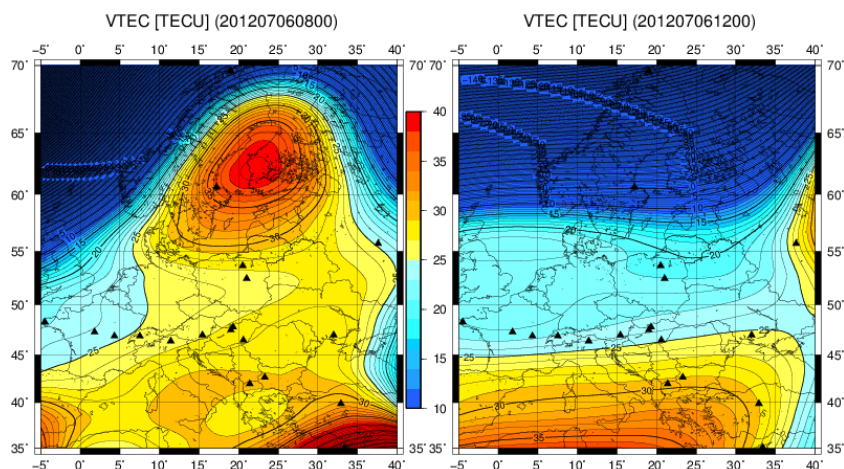
2. tézis

Az egyfrekvenciás fázismérések feldolgozásának pontosítása érdekében különféle ionoszféra modelleket vizsgáltam. 52 állomás kódmeréseiből hoztam létre Magyarországra vonatkozó ionoszféra modelleket, melyek segítségével nem csak a vizsgált területre eső, vagy ahhoz közel álló állomás méréseit tudtam feldolgozni, hanem a területtől akár 1300 km-re lévő állomás feldolgozásánál is jelentős pontosságjavulást értem el. Az ionoszféra modell használata nélkül tapasztalt 2 – 3 méteres átlagos koordináta eltéréseket a modellek segítségével 30 – 40 cm-es, esetenként 10 – 20 cm-es eltérésekké tudtam redukálni. A kapott eredmények alapján igazoltam, hogy a PPP technika geodéziai pontosságot kizárólag két frekvencián való észleléssel képes szolgáltatni, de lokális modellek alkalmazásával az egyfrekvenciás helymeghatározás pontossága is szubméteres nagyságrendre javítható.

A vizsgálat célja az egyfrekvenciás (L1) vevők által elérhető pontosság javítása különböző ionoszféra modellek bevezetésével.

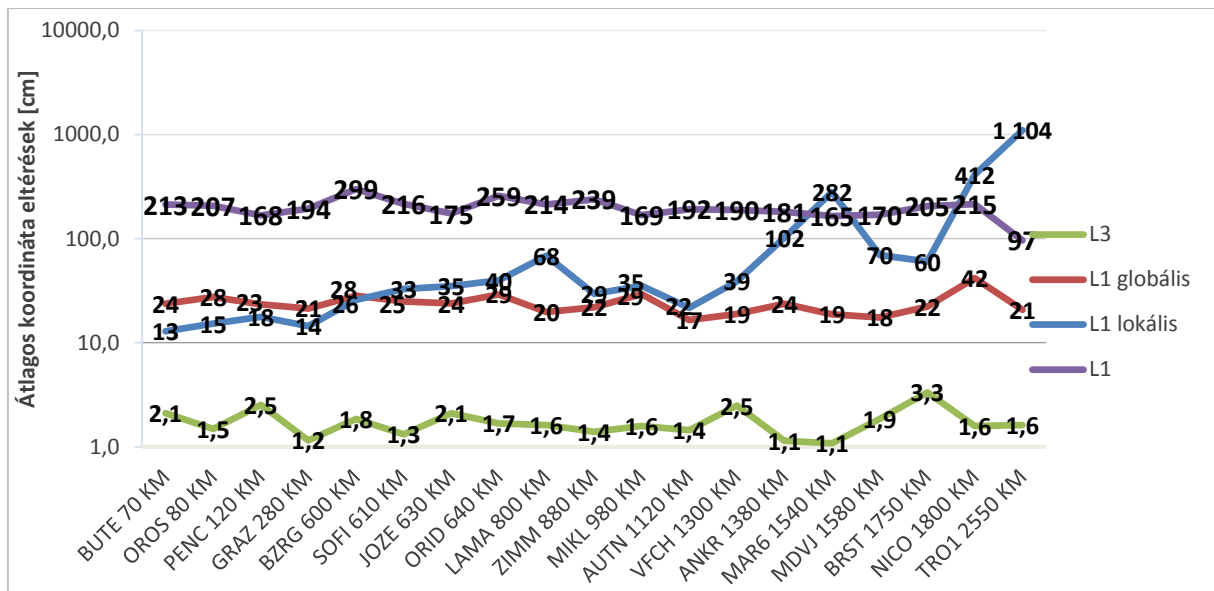
Létrehozott / felhasznált ionoszféra modellek:

- Lokális (52 magyar és szomszédos permanens állomás kódmeréseiből általam létrehozott)
- Globális (CODE által publikált, az IGS állomásokon alapuló globális ionoszféra modell)



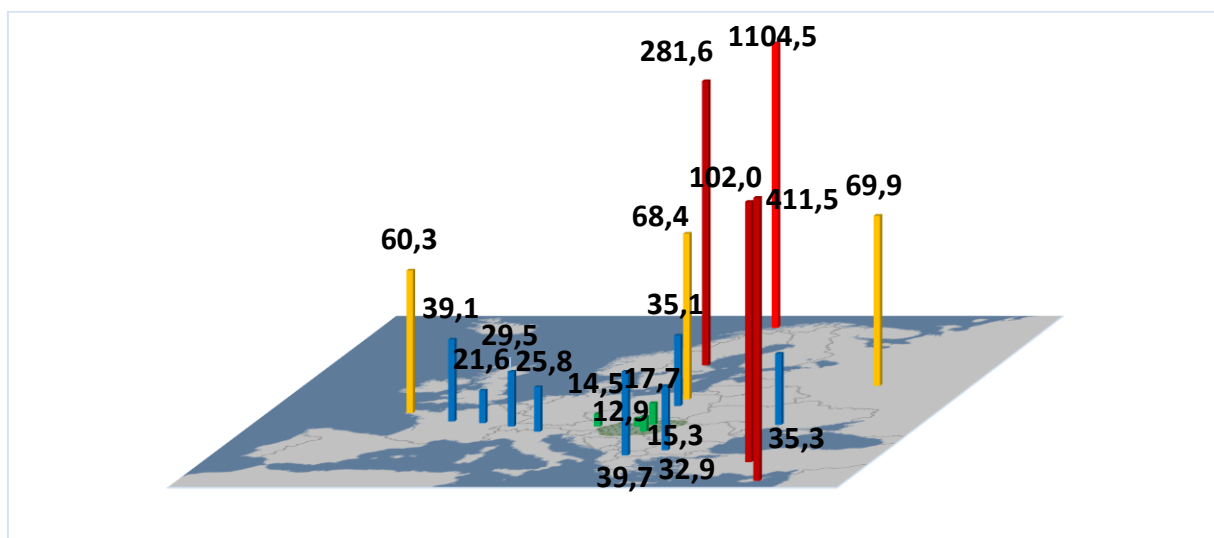
4. ábra Magyar permanens állomások kódmeréseiből levezetett ionoszféra modell, és az extrapolációból származó durva hibák

A 4. ábrán látható, Magyarországtól egyre távolodó permanens állomások mérési adatait dolgoztam fel a felsorolt modellek használatával. Emellett ionoszféra modell használata nélkül (Önálló – L1) és ionoszféra-mentes (L3) esetet is vizsgáltam. Az állomások hivatalosan elfogadott és az általam számított koordináták közötti eltérését az 5. ábra mutatja.



5. ábra Koordináta eltérések az egyes állomásoknál [cm] a távolság függvényében (logaritmikus skála)

Az eredmények szerint az ionoszféra-mentes (L3) feldolgozás képes a geodéziai pontosságot elérni, de ehhez szükség van kétfrekvenciás vevő használatára. Globális ionoszféra modell bevezetésével az egyébként 2–3 méteres átlagos koordináta eltéréseket mutató (Önálló – L1) feldolgozás ~30 centiméteressé (~10 cm-es szórással) javítható. A magyar permanens állomások méréseiből létrehozott ionoszféra modell eredményeit három részre bonthatjuk: **1.:** a lokális modell által lefedett területen jellemzően 20 cm alatti koordináta eltéréseket (~10 cm-es szórással) tapasztalhatunk. **2.:** a lokális modell által lefedett területtől távolodva ezen eltérések csupán 30-40 cm-es eltérésekké (~20 cm-es szórással) javíthatók. A modell kelet-nyugati irányban akár ~1300 km távolságban is használható, míg észak-déli irányban ez a távolság ~640 km-re csökken az ionoszféra elektrontartalmának mágneses szélességtől való függése miatt. **3.:** Bizonyos távolság után a lokális modell használata nem tanácsos/tilos, hiszen az extrapolált TEC értékek „félrevezetik” a feldolgozást, így okozva kiemelkedően nagy hibákat. Ezeket az eredményeket szemlélteti a 6. ábra.

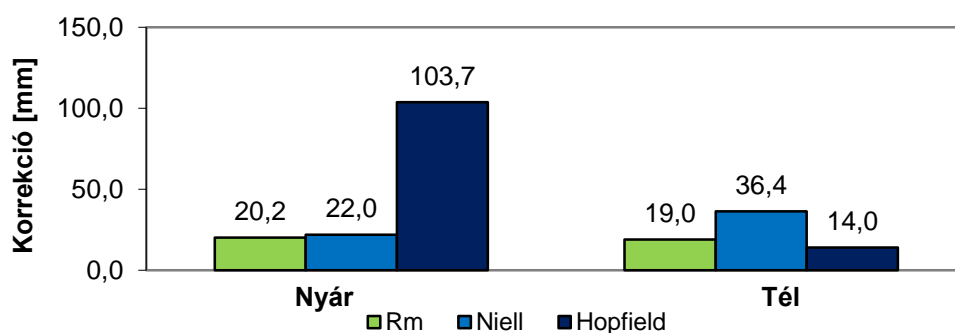


6. ábra Átlagos koordináta eltérések lokális ionoszféra modell esetén az egyes állomásoknál [cm] – 24 órás észlelés

3. tézis

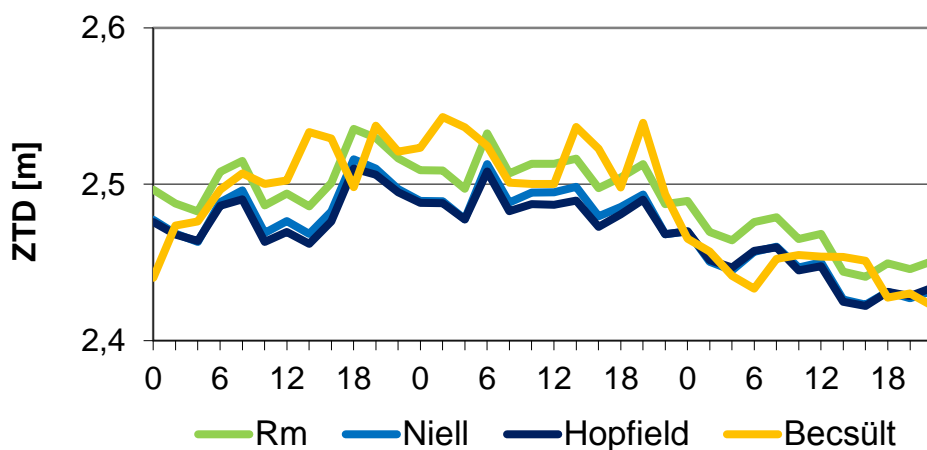
Megvizsgáltam a rendelkezésre álló troposzféra modellek által szolgáltatott késleltetések megbízhatóságát, és a koordináta megoldások pontosságára gyakorolt hatását. Megállapítottam, hogy zenit irányú troposzférikus késleltetés számításához a helyi meteorológiai adatok alapján létrehozott regressziós modell alkalmazása, a Niell és Hopfield modell átlagosan 3 cm-es eltéréséhez képest 50%-os javulást eredményez. A PPP feldolgozás során becsült troposzférikus késleltetésekhez képest, mind a csapadékosabb nyári, mind a nyugodtabb téli időszak esetén ~2 cm-es eltéréseket tapasztaltam. A Niell modell a téli időszakban, a Hopfield modell a nyári időszakban becsülte túl a késleltetéseket, ezzel szemben a regressziós modell mindkét esetben stabil megoldást biztosított. Az eredmények alapján a helyi meteorológiai adatokon alapuló regressziós modellt javaslom az a priori késleltetések számításához.

A troposzféra modellek vizsgálatához egy zivataros és egy meteorológiailag nyugodt időszakot választottam. Az általánosságban használt Niell modellhez (Saastamoinen modell Niell leképzési függvényel) hasonlítottam a széles körben használt Hopfield és a Magyarországon több mint 10000 rádiószondás mérésekből levezetett Regressziós modellt (RM). A feldolgozáshoz a Budapesten és környékén elhelyezkedő permanens állomásokot vizsgáltam. Azért ezeket, mert erre a területre álltak rendelkezésemre meteorológiai adatok.



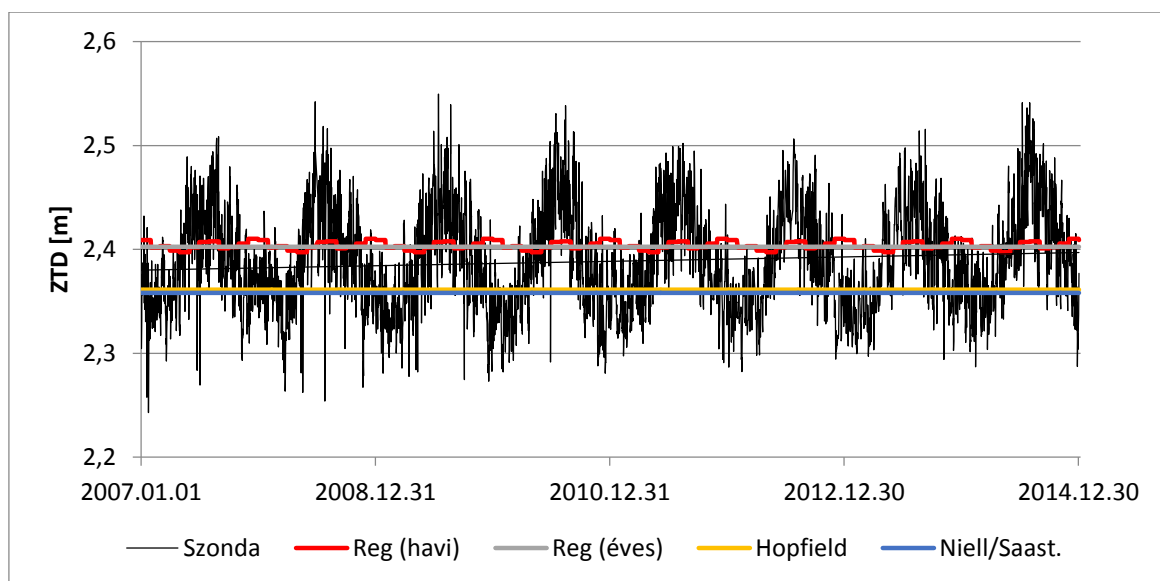
7. ábra Átlagos eltérések az 'a priori' és a feldolgozás során becsült troposzférikus késleltetések között

A meteorológiai adatok felhasználásával létrehoztam a feldolgozáshoz szükséges a priori ZTD (Zenit irányú teljes késleltetés – Zenith Total Delay) értékeket. Ezeket az értékeket a feldolgozás során becsült értékekhez hasonlítottam. A 7. ábra tartalmazza a két fajta érték közti eltéréseket mind a zivataros nyári, mind a nyugodt téli időszakban. Látható hogy az eltérések az RM esetében a legalacsonyabbak, míg a Hopfield modell extrém zivataros esetben való használatakor mennyire magasak. Az állomások közül a JASZ állomás a priori és becsült ZTD adatait tartalmazza a 8. ábra.



8. ábra A priori ZTD értékek és a feldolgozáskor becsült ZTD értékek JASZ állomáson 2006. 08. 19-21-ig

A valós (becsült) és az a priori ZTD értékek láthatók a vizsgált három nyári nap folyamán. A regressziós modell jobban megközelíti a valós értékeket, mint a másik két modell. GPS mérések során általában nem áll rendelkezésünkre meteorológiai mérőeszköz, ezért ezen értékek helyett a sztenderd atmoszféra adatokból számított értékeket vesszük alapul. Az ezeket az értékeket felhasználó modellek alapján számított teljes zenit irányú késleltetést (ZTD) hasonlítottam össze a Budapesten naponta kétszer, Szegeden pedig egyszer mért értékekhez (9. ábra).



9. ábra A szonda által szolgáltatott és a modellekből számított ZTD [m] értékek - Budapest

Az ábrán jól látható a globális modellek alulbecslése, míg a havi és éves paramétereket felhasználó regressziós modell sokkal jobban „illeszkedik” a mért értékekre. Szórás és tartomány tekintetében nincs jelentős eltérés, de az átlagos eltérések esetében látható, hogy a regressziós modell jobban szerepel, mint globális társai. A 3 cm-es átlagos eltérés helyett közel 50%-os javulást, azaz 1-2 cm-es átlagos eltérést érhetünk el a regressziós modell alkalmazásával. Abszolút értékben ez ugyan csak néhány centiméteres javulást jelent, azonban valós idejű alkalmazásoknál a jövőben ez is jelentős lehet.

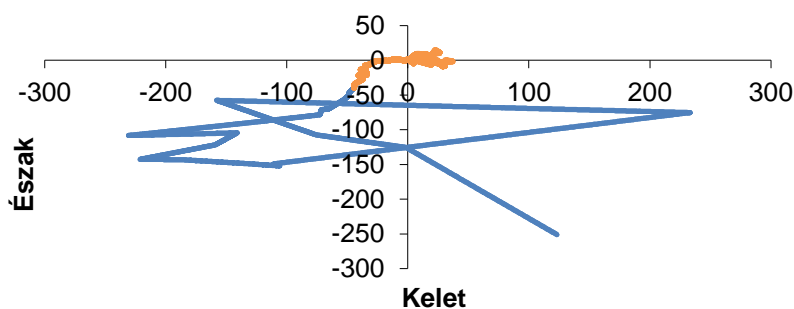
4. tézis

Megvizsgáltam a kinematikus GPS mérések feldolgozását PPP technikával illetve hagyományos RTK és statikus PPP kombinációjával. Megállapítottam, hogy vízszintes értelemben 5 cm alatti pontosság mindkét esetben elérhető, azonban a ciklusugrások kivédésére és a meghatározott magasságok hibáinak csökkentése érdekében a kinematikus PPP feldolgozással szemben, mely esetenként akár deciméteres nagyságrendű eltéréseket mutatott, a hagyományos RTK és a statikus PPP technika kombinációját ajánlom. Kimutattam, hogy az ajánlott módszerrel alaphálózatokkal nem rendelkező területeken is geodéziai pontosságú RTK méréseket hajthatunk végre, egyúttal biztosítva a ciklusugrásokkal szembeni optimális védelmet.

Gyakorlati mérésekből vezettem le a középhiba nagyságát az észlelési idő függvényében. Az ezek alapján létrehozott egyenletek segítségével a mérés előkészítésekor az elvárt pontosság ismeretében tervezhető a szükséges észlelési idő hossza.

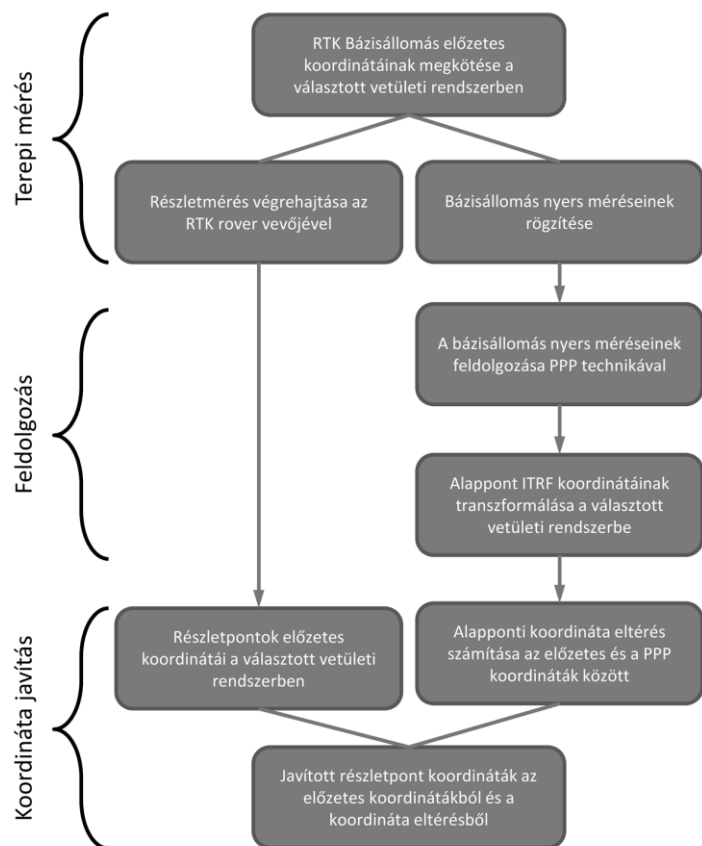
Vizsgálataim alapján a statikus PPP helymeghatározásra leveztem az észlelési idő és a koordináta megoldás pontossága közötti összefüggést, amely segítségével a várható koordináta-meghatározási pontosságot lehet az észlelési idő függvényében becsülni mind vízszintes, mind magassági értelemben. Az Egyiptomban zajló régészeti ásatásnál, sivatagi körülmények között egy domborzatmodell létrehozása volt a cél. Alappontok hiányában a PPP technika ad lehetőséget arra, hogy a későbbi régészeti kutatások ugyanabban a vonatkoztatási rendszerben történjenek, hiszen felmérési hálózatot állandósítani nem lehet. A felmérés egy folyamatosan mozgó vevővel történt. A rendelkezésre álló mindkét lehetőséget megvizsgáltam.

Végezhetünk abszolút kinematikus helymeghatározást, melynél utófeldolgozással tudunk a bemért pontoknak koordinátát számítani. Ebben az esetben egy kezdeti inicializálási idő után a folyamatos észlelésnek köszönhetően akár másodpercenként tudunk koordinátát adni a részletpontoknak. A technika gyenge pontja az utófeldolgozásban rejlik, hiszen csak ekkor derülhet fény az esetleges ciklusugrásokra. Ezen felül az inicializálási idő hossza ismeretlen, csak becsülni lehet a korábbi mérésekből. A 10. ábrán jól látható a kezdeti inicializálás álló vevő esetén. Az inicializálási idő átlagosan 300 epocha hosszúságú.



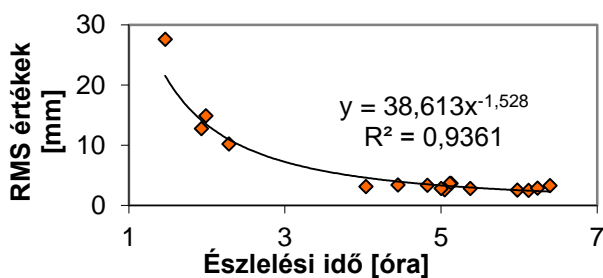
10. ábra Vízszintes koordináták változása egy álló vevő esetén [mm]

Másik lehetőségünk a hagyományos RTK mérés. Ebben az esetben egy PPP utófeldolgozással létrehozott alapponton üzemeltetjük a bázis vevőt. Ezt azonban nem szükséges előre létrehozni, elegendő az RTK mérések alatt a bázis vevő nyers méréseit rögzíteni a későbbi PPP számításokhoz. Mivel a bázis vevő nem mozog, kisebb az esély egy esetleges ciklusugrásra illetve a megfelelő észlelési időre is több idő hagyható. Ezalatt a rover vevővel a részletmérés elvégezhető. A felmérés koordináta-rendszerét célszerűen az adott feladathoz illeszkedően kell felvenni (ETRS89, EOV, UTM). A bázisállomás koordinátáit ebben a választott vetületi rendszerben megkötni és elvégezni a részletmérést a roverrel. A részletmérést követően a részletpontok előzetes koordinátái ismertek, melyek tartalmazzák az alappont koordináta hibáját. Utófeldolgozáskor PPP technikával az alappont koordinátáit ITRFy rendszerben kapjuk immáron geodéziai pontossággal (az észlelési időtől függően), melyet transzformálni kell a választott rendszerbe. Ekkor számítható az eltérés az ideiglenesen felvett álláspont koordináták és a PPP-vel számított koordináták között. Ezzel a koordináta eltéréssel az előzetes részletpont koordinátákat javítva a pontos helyére illeszthetjük a felmért pontokat, vagy ha a rover vevő is tárolta a nyers méréseket, újbóli feldolgozás után immáron a bázis PPP által pontosan meghatározott koordinátaira támaszkodva a részletpontok koordinátáit újraszámíthatjuk. A mérés folyamata a 11. ábrán látható. A több napig tartó mérésekből az észlelési idő és a koordináta-megoldás RMS hibája között összefüggést vezettem le (12. és 13. ábra).

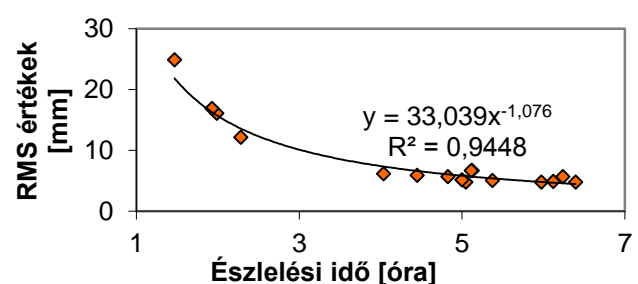


11. ábra Hagyományos RTK és statikus PPP kombináció mérési folyamata

A részletmérést követően a részletpontok előzetes koordinátái ismertek, melyek tartalmazzák az alappont koordináta hibáját. Utófeldolgozáskor PPP technikával az alappont koordinátáit ITRFy rendszerben kapjuk immáron geodéziai pontossággal (az észlelési időtől függően), melyet transzformálni kell a választott rendszerbe. Ekkor számítható az eltérés az ideiglenesen felvett álláspont koordináták és a PPP-vel számított koordináták között. Ezzel a koordináta eltéréssel az előzetes részletpont koordinátákat javítva a pontos helyére illeszthetjük a felmért pontokat, vagy ha a rover vevő is tárolta a nyers méréseket, újbóli feldolgozás után immáron a bázis PPP által pontosan meghatározott koordinátaira támaszkodva a részletpontok koordinátáit újraszámíthatjuk. A mérés folyamata a 11. ábrán látható. A több napig tartó mérésekből az észlelési idő és a koordináta-megoldás RMS hibája között összefüggést vezettem le (12. és 13. ábra).



12. ábra Vízszintes koordináták RMS értékei az észlelési idő függvényében



13. ábra Magassági koordináták RMS értékei az észlelési idő függvényében

A tézisekhez kapcsolódó tudományos közlemények

Tuchband Tamás (2008): Nagypontosságú abszolút GPS helymeghatározási technika pontossági vizsgálata (megjelenés alatt), *Doktori kutatások a BME Építőmérnöki karán*. 12 p.

Tuchband Tamás (2010): Evaluation of the EGNOS troposphere model in precise point positioning applications. *Pollack Periodica*, 5/2. 27–38. doi:10.1556/Pollack.5.2010.2.3

Tuchband, T., Rózsa, Sz. (2010): Zenit irányú troposzférikus késleltetés modellezése, meteorológiai adatokon alapuló helyi regressziós modell segítségével. *Geomatikai Közlemények*, XIII:2, 65–72.

Tuchband T., Rózsa Sz. (2011): Modeling tropospheric zenith delays using regression models based on surface meteorology data *International Association of Geodesy Symposia*, Vol. 136, 789–795. doi: 10.1007/978-3-642-20338-1_99

Tuchband Tamás (2011): GPS Precise Point Positioning with kinematic data. *Pollack Periodica*, 6/3. 73–82. doi:10.1556/Pollack.6.2011.3.7

Rózsa Sz., Tuchband T. (2011): A GNSS észlelések szerepe a légköri kihullható vízmennyiség meghatározásában, *Építőmérnöki Kar a Kutatóegyetemért*, Budapest, BME Építőmérnöki Kar, 7–12.

Nem publikáció értékű munkák

Tuchband T., Rózsa Sz., Laky S. (2008): A GPS PPP technika pontossági vizsgálata, Geomatikai Szeminárium 2008, Sopron

Tuchband Tamás (2011): A légkör vízgőztartalmának meghatározása a GPS korában, BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszék, Tudományos ülés 2011.11.16., Budapest

Tuchband T., Rózsa Sz., Kenyeres A. (2011): Comparison of different GNSS processing schemes used for the estimation of precipitable water vapour, AGU Fall Meeting 2011, San Francisco, USA

TDK és OTDK dolgozat

Tuchband Tamás (2007, 2009): A GPS PPP technika pontossági vizsgálata, BME Építőmérnöki kari TDK 2007., Miskolci egyetem OTDK 2009. műszaki tudomány szekció