

Opponensi vélemény

Rózsa Szabolcs

„A geodéziai, geodinamikai és atmoszférakutatások a műholdashelymeghatározásban”
című akadémiai doktori értekezéséről

Témaválasztás és az értekezés célkitűzései

Az értekezésben a szerző az utóbbi, közel húszévben elért tudományos eredményeinek összegzését tűzte ki célul, amely során a geodéziai és GNSS ismeretein túl a geodinamika, a valószínűségszámítás és statisztika, a légkör fizika, valamint a léginnavigáció szakterületén is elmélyült tudásra tett szert. Tevékenységének vezérfonalát maga a GNSS-technológia különböző alkalmazásai jelentik. Különös hangsúlyt fektet a troposzféra modellek vizsgálatára és azok geodinamikai, légkörfizikai és léginnavigációs alkalmazásaira. Ezek a kutatások időben is jól illeszkedtek a nemzetközi irányvonalakhoz, fontosabb publikációi új tudományos eredménynek minősültek.

Alkalmazott módszerek és adatok

A szerző alaposan tanulmányozta és hivatkozta a mértékadó szakirodalmat, tesztelte a különböző használatban lévő modelleket és módszereket, amelyek hiteles adatbázisokból származó helyi és nemzetközi légkörfizikai és GNSS adatbázisokból származtak. A dolgozat egyik erőssége az adatok és a kifejlesztett módszerek alapos statisztikai vizsgálata, amely a földtudományok közül leghangsúlyosabban talán a Geodéziában játszik fontos szerepet.

Nyelvi, alaki és formai értékelés

Nyelvezete megfelelő, az egy-két kisebb elütés és elírás nem zavarja a dolgozat érthetőségét. Néhány képlet változóinak és a nagyon sok betűszónak a meghatározása néha több fejezettel korábban történt, ezért célszerű lett volna ezek közül a fontosabbakat a dolgozat elején egy jegyzékben összefoglalni. Az értekezés anyaga angol és magyar nyelvű publikációkból származik, ezért néha keveredhettek hasonló jelentésű elnevezések is (pl. szórás, középhiba, RMS és RMSE).

A dolgozat szerkezeti felépítése

A dolgozat felépítése logikus és jól áttekinthető. A dolgozat az **1.** és **2. fejezetben** egy tömör bevezetéssel és a GNSS mérések feldolgozásának szükséges mértékig történő bemutatásával kezdődik (1-15. oldal). A szerző a dolgozat lényegi részét három fejezetben fogalmazta meg:

A **3. fejezet** a szabatos GNSS hálózati mérések és ismételt szabatos szintezések feldolgozását és geodinamikai értelmezését foglalja össze a Felső Rajna-árok környezetében (16-68. oldal).

A **4. fejezet** a légkör integrált vízgőztartalmának GNSS technikával történő meghatározását és vizsgálatát mutatja be (69-99. oldal).

Az **5. fejezet** a navigációs helymeghatározásban alkalmazott troposzféra modellek továbbfejlesztésével foglalkozik (100-143. oldal).

A **2-5. fejezetek** több alfejezetből állnak, ahol a feladat, a módszertan és a tényleges eredmények bemutatása történik (ezeket bővebben a következő részben érintem).

A **6. fejezet** az összegzést és a tézisek bemutatását tartalmazza (144-148. oldal).

Kérdések és megjegyzések

2 fejezet:

(I.) A GPS előnyeit a NNSS Transit (Doppler) rendszerhez viszonyítva annak sokkal kedvezőbb használhatóságában jelöli meg. Ez nagyrészen annak is köszönhető, hogy a GPS egyidőben legalább 4 vagy annál több műhold egyidejű megfigyelését teszi lehetővé, szemben a Transittal, amely nagyjából 1-2 óránként tette lehetővé egy-egy alkalmas műhold-átvonulásának a megfigyelését.

2.1.1.2 fejezet:

(II.) A leírás megemlíti, hogy a troposzféra, vagyis a tropopauza feletti semleges réteg is okoz jelentős késleltetést (~0.5 m vertikális). Hasonló a helyzet az ionoszférával is, mivel a plazmasféra szabadelektronjainak késleltetése sem elhanyagolható (~0.1 m vertikális).

2.1.2.3 fejezet:

(III.) Az ionoszférkus refraktivitás egységtől való eltérése elméletileg frekvenciafüggő hatványsorral írható le ($f^{-2}, f^{-3}, f^{-4}, \dots$, az első három tag együtthatója is ismert). Mivel az első (f^{-2}) tag a hatások ~95-99% tartalmazza a két frekvencián történő mérések is tartalmazhatnak maradék hibákat, amihez a görbült út menti terjedés is hozzájárul. Mivel az egyenletekben ezt a hatást az f^{-2} függvényében írják le, matematikailag ez a tag valóban kiejthető. Ez a hatás hely, évszak, napszak és az ionosféra állapotától is függ.

3.4 fejezet:

(IV.) Az *antenna geometriai középpontja* helyett szabatosabb lenne az *antenna geometriai referenciapontját* használni, amely gyakorlatilag az antenna alapsíkjában a csatlakozó furat középpontját jelenti (ARP).

(V.) Az antennák fáziscentrumának magassági szög és azimut függőségének elhanyagolásából származó hibákat először a kontinentális hálózatok nagyon hosszú vektorainál tapasztalták. Kezdetben olvasni lehetett az antennaforgatás elektromosan visszhangmentes csarnokban történő végrehajtásáról is, amely a többutas terjedést is küszöbölhette volna. **Mi lehet az oka annak, hogy ez a módszer a gyakorlatban nem terjedt el?**

(VI.) A KARL és KLOP permanens állomások antenna csereiből adódó koordináta ugrások EPN általi és a saját meghatározása közötti eltéréseket a két különböző antenna modellel magyarázta. **A két modell adott fáziscentrum értékei között mekkora az eltérés? Mennyiben járulhatott ehhez hozzá az EPN 33+33 és a saját 7+7 napos feldolgozása közötti különbség?**

(VII.) Az egyedi abszolút modellek relatív modelleké történő alakítása a homogenitás biztosításáért lényegében degradációt jelent. **Vizsgálta-e, hogy önmagában ez a változtatás mekkora eltérést okozhat, hasonlóan a két eltérő relatív modell eltéréseihez? A korábbi relatív modellek helyett nem lehetett volna abszolút típus modelleket alkalmazni?**

3.5.1 fejezet:

(VIII.) Karlsruhei Egyetem kifejlesztett, különböző időpontokban meghatározott hálózatok járulékos hasonlósági transzformációs paraméterekkel történő együttes kiegyenlítése bonyolultnak tűnő, de szabatos megoldást szolgáltat. **A megadott egyenletek két időpontra vonatkoznak, több időpontra is kiterjeszhető?** (A (3-3) egyenletben lemaradt egy 2-s index.)

3.5.2 fejezet:

(IX.) A „mozdulatlannak” tekinthető referencia pontok térbeli elhelyezkedése (a tektonikai ismeretek mellett is) nagy jelentőséggel bír. Elméletileg, ideális esetben ezek közre fogják a feltehetően „mozgó” pontokat. A referencia pontok súlypontjától távolodva növekednek a

hibaellipszisek is. Ez kis részben a 3-10. ábrán is megfigyelhető. A ZIMM és STUT pontok párhuzamosan jól követik az elnyúló hálózatot és a beépített transzformációs paraméterek is nagyrészt kiküszöbölték a nemkívánatos hatásokat. ***A sárgával jelölt pontok nagyobb megbízhatósága mivel magyarázható?***

3.6.1 fejezet:

(X.) Az ismételten mért szintezési vonalak vizsgálatokhoz csak független szintezési vonalak álltak rendelkezésre. A pontmagasságok (»magasság függvény) helyett, csak a szomszédos pontok közötti magasságkülönbségeket, azaz a differenciákat (»differenciál függvény) alkalmazta. Ez az eljárás analóg a GNSS és radar interferometria fázis ugrásainak kimutatásával, de ott egész hullámhosszokat keresünk. A 3-13 ábra és annak értelmezése helyes, abban az esetben, ha szilárd blokkok egységes magassági eltolódást mutatnak. Ebben az esetben a szakaszpontok közötti eltérő távolságoknak nincs jelentősége. Ha azonban az egyes szilárd blokkok meg is dőlnek, a differenciák az előző esethez hasonló képet mutathatnak. A dőlést csak a távolsággal arányos normalizálással lehetne kimutatni. (A rugalmas deformáció további bonyodalmakat okozna.) ***Vizsgálta-e az estleges döléseket?***

3.6.2 és 3.6.3 fejezetek:

(XI.) Ezekben a fejezetekben (és alfejezetekben) bemutatott következetes vizsgálatok eredményeit helytállónak tartom, amely a jelölt multidiszciplináris ismereteit és szubjektív megérzéseit is jól tükrözte.

A 3.7 fejezet:

(XII.) A fejezet elején hivatkozott publikációk műholdradar interferometria és GNSS mérések ellentmondásánál célszerű megjegyezni, hogy a le- és felszálló irányú radar felvételekből csak K-NY-és magassági elmozdulásokat lehet kimutatni, ami csak azt jelzi, hogy az elmozdulásoknak ilyen vízszintes összetevője is van. (A cikkeket sajnos nem ismerem.)

(XIII.) A Nevadai Egyetemen több mint 17 000 permanens állomás IGS14 rendszerre vonatkozó, szabadon elérhető, éves koordináta idősora valóban „aranybányának” tekinthető. A vizsgált területen és környezetében 44 alkalmas állomás ~13 éves adatsorát lehetett feldolgozni. Első lépésében a koordináta változások vizsgálatát és szűrését a szabadon elérhető HEKTOR szoftverrel végezte el, amely a lineáris trendtől való eltérést sztochasztikus folyamatnak tekinti: meghatározza a fehérzajt, a villódzás (flicker) és a véletlen bolyongás spektrális indexit, továbbá a féléves és éves periódusokat is. Az adatsorok fehérzajt, villódzást és a két periódust jelenlétét is mutatták. ***Mi okozhatja a periódusok jelenlétét és különösen a villódzást?***

(XIV.) A levezetett sebességek az Eurázsiai-lemez globális mozgását tükrözik. Ezért az EPC szoftver segítségével lokális Euler pólust és az ahhoz tartozó forgási sebességet is meghatározta, hogy a maradék sebességek a lemezen belüli elmozdulásokat tükrözzék. ***Ez mennyivel kedvezőbb eredményt szolgáltatott, mint az Eurázsiai-lemez más forrásból származó Euler pólusai.***

(XV.) A maradék sebességekből a StrainTool szoftverrel négyzetrácsba interpolálta a vízszintes sebességeket, és minden pontban meghatározta a sebességfüggvény paramétereit (vízszintes sebesség, elfordulás és strain tenzor). A 3-25. ábra ellipszisei csak a tenzorok sajátértékeit ábrázolják. ***A további paraméterek nem szignifikánsak? A tenzorok rugalmas deformációra is utalhatnak? Az interpoláció mennyeire „mossa össze” a 3-22. ábrán látható jellegzetességeket?***

4. fejezet:

(XVI.) A (4-3) képlet második tagja elírást tartalmazhat, eltér a (4-1) képletbe a ($p_d = p - e_v$) behelyettesítésből származtatható összefüggéstől.

(Az elnevezéssel kapcsolatban megemlíteném: mivel nem ideális gázokról van szó, a „hidrosztatikus” összetevő sem közelíti meg mindig a hidrosztatikai egyensúlyi állapotot, és ez az egyensúly ugyan ritkán, de a „nedves” tagnál is előfordulhat.)

4.1 fejezet:

(XVII.) A 4-13. és 4-14. képletekben nem szerepel c állandó (d ?).

A 4-2. ábra és a 4-1. táblázat összehasonlítása alapján számomra nem egyértelmű a táblázat tartalma. Az ábrán látható szonda adatok azonosak tűnnek a táblázat első sorával, ezekhez a GNSS értékek is jól illeszkednek, de a táblázat két utolsó sorában vélhetően csak a GNSS adatok szondától való eltéréseinek a statisztikája található.

4.2.1.2 fejezet:

(XVIII.) A szomszédos légrétegek késleltetésének összegzése során a törésmutatók korrelációjának figyelembe vétele a habterjedés törvényének figyelembevételével valóban indokolt lépés. ***A magassági hibák korrelációjára vonatkozóan végzett-e vizsgálatokat?***

4.2.2 fejezet:

(XIX.) A ZHD értékek becslésére több tapasztalati modellt is bemutat a dolgozat. Saastamoinen a gáztörvénynek megfelelő hidrosztatikai egyensúlyi állapotnak megfelelő függvényt adta meg az akkor érvényes (k_1, R_d és g_m) konstansok függvényében (4-28 képlet).

4.3 fejezet:

(XX.) Ahogy az anyagban is szerepel a T_m jól definiálható mennyiség (4-9 képlet), ennek ellenére a felszíni hőmérséklet függvényében is jelentős linearitást mutat (4-7 ábra.). Azonban az is jól látszik, hogy konkrét T_s értékeknél is nagyon nagy változékonysággal jellemezhető, amely részben a régió nagyságával is magyarázható. Ugyan ez a helyzet a D^{-1} paraméter esetében is (4-8. ábra). ***Mennyit javíthatna a becsléseken, ha jellemző helyi (térbeli és időszakos) adatokhoz illesztett modelleket alkalmaznának?***

4.5 fejezet:

(XXI.) A kifejlesztett rendszer és eredményei nagyon meggyőzőek. Akkor is használható adatokat szolgáltathatnak, amikor a szondás megfigyelések pl. viharos körülmények között nem, vagy nem megfelelően végezhetőek el.

4.6 fejezet:

(XXII.) A kifejlesztett rendszer meteorológiai tesztelése is nagyon meggyőző, ami azt is jelenti, hogy a közel valós idejű ZTD értékek is megfelelő pontosságúak. ***Ha a szolgáltatóközpontok ezeket a ZTD adatokat is továbbítanák, és ezt a GNSS vevők is kezelni tudnák, mennyivel növelhetnék meg a geodéziai vevők RTK alkalmazásainak pontosságát.***

5.1.4 - 5.1.6 fejezetek:

(XXIII.) Az átfogóan alkalmazható un. lokális „vak” modellek közül a GTP2 tovább fejlesztésére egy új modellt vezetett be (LOC), amelynél a GTP2-től eltérően a meteorológiai paraméterek éves és féléves periódusait is figyelembe vette. Az új LOC modell paramétereit közvetlenül globális rádiószonda állomások adatai alapján határozta meg, amely a regionális jellegzetességeket is jól követi (5-3. ábra). A GTP2 és LOC modellek hasonló eredményre vezettek, de jóval kedvezőbbek a standard RTCA modellnél, amely csak időszakos változásokat követ (5-2. ábra). ***Mivel magyarázható, hogy az 5-2. és 5-3. táblázatokban és az 5-3 ábrán a***

ZHD értékeknél a GPT2, míg a ZWD értékeknél a LOC tűnik kedvezőbbnek, még ha az eltérések nem is jelentősek.

5.2 fejezet:

(XXIV.) A légiközlekedési védelmiszint megbízhatósági követelményeinek teljesüléséhez a troposzférikus késleltetések nem normális eloszlású szélső értékeit Gumbel eloszlással vizsgálta. Az erre a célra kifejlesztett különböző modellekkel meghatározott paramétereket összehasonlította az 5-8. ábrán bemutatott globális szonda állomások adataiból levezetett értékekkel. A legnagyobb pozitív és a legnagyobb negatív éves eltéréseket (5-9. ábra) használták a Gumbel eloszlás szerinti hibák maximális értékeire vonatkozó valószínűségi szintek meghatározására (5-10. ábra). A normális eloszlás mibenlétét a központi eloszlás tétel írja le, amely elméletileg végtelen nagy hibákat is megenged. Azonban a vizsgálatok azt is igazolták, hogy a tapasztalt szélső értékek is mutatnak statisztikailag jellemző tulajdonságokat (Gumbel, Fréchet és Weibull eloszlás). **A gyakorlati vizsgálatok alapján lehet-e következtetni arra, hogy milyen forrásból származhatnak ezek a visszatérő szélsőséges értékek?**

5.3 fejezet:

(XXIV.) Az RTCA (2006) szabványszerű ajánlása meghatározza a konfidencia henger (5-6. ábra) becslésének összefüggéseit (5-29, 5-30 és 5-31 képletek). A d_{KE}^2 definíciójánál pontosabb lenne keleti és északi koordinátatengely mentén értelmezett hibaeloszlások kovarianciáját használni.

A teljes modell az ionoszférkus késleltetések maradék hibáinak figyelembevételét is előírja. A két frekvencián történő mérés ugyan nagyrészt kiküszöböli ezt a hatást, de mértéke az egyenlítő környékén, nappali órákban és ionoszféra zavarok esetén nagyobb is lehet. Utóbbiak akár vételi zavarokat is okozhatnak. **Milyen súllyal szerepelnek ezek a hatások a modellben?**

(XXV.) Az RTCA (2006) feltételezi, hogy a hibahatások a vertikális (d_v) és vízszintes (d_{ni}) koordináta tengelyek menti összetevőkkel írhatók le. A 3D koordináta meghatározás variancia-kovariancia mátrixának három sajátértéke általában ettől eltérő irányokba mutat, ezért elméletileg a legnagyobb sajátérték magassági és vízszintes komponensét kellene figyelembe venni. **Ez az eltérés mennyiben kezelhető a biztonsági állandókkal?**

5.3.1 – 5.3.8 fejezetek:

(XXV.) Ezek az alfejezetek részletesen ismertetik az újonnan kifejlesztett vizsgálati módszert, amelynél a szondázási adatok helyett most numerikus időjárási modelleket alkalmazott. Három viszonylag kevés paraméterrel leírható új globális modellt (ARTE BGM, BCM és GCM) fejlesztett ki, amely más modellekkel összehasonlítva (pl. RTCA) kedvezőbb megoldást szolgáltat, továbbá az IGS állomások által levezetett értékekhez is jól illeszkedik.

A bemutatott eredmények alapján helyes-e az a következtetés, hogy az életbiztonságra vonatkozó kritikus alkalmazásoknál, ellentétben az extrém meteorológiai jelenségekkel, nem a troposzférikus késleltetési modellek jelentik a legveszélyesebb hibaforrást?

Új tudományos eredmények értékelése

A dolgozat 6. fejezete és a Tézisfüzet foglalja össze az új tudományos eredményeket. A Tézisfüzet részletesebben mutatja be az eredmények szakmai előzményeit, ezért ez a dolgozat rövidített verziójának is tekinthető. Tartalmában megfelelt volna a korábbi „rövid értekezés kivételes forma” követelményeinek is.

Az **1. tézist** annak megfogalmazásában új tudományos eredmények tekintem, ami lényegében a tektonikai modell meghatározását jelenti. Az 1.1 és 1.2 altézist az 1. tézis szerves részének tekintem, amelyeket a megoldandó kérdésekre vonatkozó logikus válaszoknak tekintem.

A **2. tézist** és annak **2.1-2.5** altéziseit önálló tudományos eredményekként fogadom el.

A **3. tézist**, annak **3.1** és **3.2** altéziseivel együtt szintén új eredménynek tekintem.

Az utóbbi két téziscsoport mindegyikében megfelelő szakmai módszereket és matematikai eljárásokat dolgozott ki, amelyek alapján a szükséges szoftvereket is elkészítette és eredményesen alkalmazta.

Összefoglaló megállapítások

A jelölt hazai és nemzetközi együttműködések során, továbbá jelentős hazai és nemzetközi pályázatok keretében is sikeres tudományos teljesítményt tudhat maga mögött, ahol többször kulcsszerepet is betöltött. Ezt az önálló és csoportosan készült publikációk is bizonyítják.

Az eredményeket hazai és nemzetközi szervezetek is elfogadták és javasolják azok alkalmazását.

Javaslat

A fentiek alapján javaslom a dolgozat nyilvános vitájának kitűzését, és az MTA doktora cím odaítélését.

Sopron, 2022. február 7.



.....

Bányai László

az MTA doktora
címetes egyetemi tanár