

Válasz Bányai László professzor úr

„A geodéziai, geodinamikai és atmoszféra kutatások a műholdas helymeghatározásban” c. MTA
doktori értekezésem kapcsán kifejtett opponensi véleményére

Professzor úr részletes észrevételeire adandó válaszaim előtt szeretném megköszönni pozitív és támogató bírálatát!

Az opponensi véleményben kifejtett megjegyzésekre és kérdésekre az alábbiakban adom meg részletes válaszaimat a véleményben római számokkal jelzett észrevételek sorrendjében.

I. Egyetértek professzor úr megjegyzésével, hogy a GPS rendszer egyik jelentős előrelépése a korábbi NNSS/Transit rendszerhez képest, hogy maga a műholdszegmens jóval több műhold egyidejű megfigyelését is lehetővé tette. Emellett az időmérésre visszavezetett mikrohullámú távmérés megvalósításával gyakorlatilag egyetlen mérési epocha adatai alapján képesek vagyunk az egész Földön (és az alacsony földi pályákon keringő műholdakon is) helymeghatározást végezni. A több műhold biztosított nagyobb lefedettség mellett ez tette lehetővé, hogy a GPS/GNSS rendszerek nagy mértékben elterjedjenek a polgári felhasználók között is.

II-III. Egyetértek professzor úr megjegyzésével a tekintetben, hogy az ionoszféra is jelentős hatással bír a rádióhullámok terjedésére. Ezt a gyakorlatban a legalább kétfrekvenciás mérések felhasználásával jelentős részben kiküszöbölhetjük, mivel a hatás első közelítésben a frekvencia négyzetével fordítottan arányos. A másod és harmadrendű tagok a frekvencia harmadik és negyedik hatványával fordítottan arányosak. Míg zenit irányban az elsőrendű hatás nagyságrendileg 1,6m, addig a másod és harmadrendű tagok 1,6cm és 0,9mm nagyságrendűek 100 TECU szabad elektron tartalom mellett (Hoque és Jakowski, 2007; Bassiri és Hajj, 1993). A kétfrekvenciás mérések lineáris kombinációját az elsőrendű hatások eltávolítása érdekében alakítjuk ki. Egyetértek azzal a megállapítással, hogy a másodrendű hatások is az abszolút helymeghatározást még akár több cm-es nagyságrendű hibával terhelhetik, a relatív helymeghatározás esetében azonban ez a hiba is jelentős mértékben tovább csökkenthető. Ily módon a gyakorlatban továbbra is a kétfrekvenciás mérések lineáris kombinációinak kialakítása során az elsőrendű hatást vesszük csak figyelembe.

IV. Egyetértek az észrevétellel, az angol szakirodalomban valóban az „Antenna Reference Point” (ARP) terjedt el. További nehézség, hogy az antenna geometriai középpontját, mint fogalmat miként is definiálhatjuk? Abban az esetben – és ez a definíció sajnos nem szerepel az értekezésben – ha az antenna geometriai középpontját az antenna alján elhelyezkedő furat középpontjával definiáljuk, akkor a két elnevezés azonos értelmet nyer. Véleményem szerint – bár az ARP nemzetközi gyakorlatban elterjedt, a magyar nyelvben az antenna geometriai középpontja az antenna geometriai referenciapontja elnevezéshez képest szebb elnevezés és a fent említett definícióval a kettő egyenértékűvé tehető.

V. Az antennák abszolút értelmű kalibrációjára, azaz fáziscentrum külpontosságának és ingadozásának meghatározása több módszert is kifejlesztettek. Ezek egyike a visszhangmentes csarnokban történő kalibráció, amit például a Bonni Egyetemen a mai napig is végeznek. Egy másik megoldás az antennák forgatásán és döntésén alapul, amelyet egy robotkar segítségével valósítanak meg (Hannoveri Egyetem, Geo++ Gmbh). Az előbbi eljárás valóban nem terjedt el, ennek döntően valószínűsíthetően a kiterjedt infrastruktúra igény szabott gátat, hiszen a jeladót és az antenna forgatását biztosító berendezést egy erre a célra létrehozott visszhangmentes helyiségben kell elhelyezni. Ehhez képest a robotkaros megoldásnál csupán egy stabil pontjel megépítése szükséges a robotkar beszerzése mellett. Utóbbit több európai helyszínen is alkalmazzák.

Ugyanakkor a robotkaros rendszer hátránya, hogy csak a már pályára állt és kiépített konstellációk által sugárzott jeleket használja fel a fáziscentrum meghatározására. Ezzel szemben a Bonni Egyetem megoldásával tetszőleges frekvenciára elvégezhető a kalibráció. Hazai releváns információ, hogy a

BME Általános és Felsőgeodézia Tanszék által a ZalaZONE Autóipari Próbapályán létesített permanens GNSS állomás antennájának abszolút kalibrálását az elmúlt években a Bonni Egyetem eljárásával végeztük el, így kaptuk meg a fáziscentrum külpontosságát az összes jelenlegi konstelláció összes frekvenciájára.

VI. A KARL és KLOP állomásokon az antennacsere hatása során tapasztalt koordinátaugrásokkal kapcsolatosan a második kérdéssel kezdem a választ. Az EPN 33-33 napos és a saját 7-7 napos relatív antennamodellekkel végzett feldolgozásán eredményeiből számított koordinátaeltéréseket a 3-8. táblázat tartalmazza. Ebből látható, hogy a kétféle megoldás között – az eltérő hosszúságú észlelésből eredően – jellemzően 1-1,5mm-nél kisebb eltéréseket tapasztaltam. Az északi komponensben ez nem érte el a 0,5 mm-t, a keleti komponensben 1,5 mm-t, míg a magassági komponensben 0,4 mm-es eltérést tapasztaltam. Így megállapíthatjuk, hogy az EPN és a saját megoldással kapott koordinátakülönbségek megközelítőleg legfeljebb 1,6 mm-es térbeli lineáris eltérést mutatnak.

Ehhez képest a tapasztalt koordinátaeltérés 35-38 mm-es nagyságúak. A vizsgálatok készítésekor érvényes IGS és NGS által használt antennamodellek fáziscentrum ingadozásának értékeit az antennák egyedi abszolút kalibrációs eredményeivel a 3-7. és 3-8 ábrán mutatom be. Az IGS és az NGS modellek gyakorlatilag 1 mm-re egyeznek egymással az egyes magassági szögeken. Ugyanakkor az egyedi abszolút kalibrációs eredmények azt mutatták, hogy a két azonos típusú új antenna fáziscentrum ingadozása – különösen az alacsonyabb magassági szögek mentén - jelentősebben 2,5 mm-re egymástól is eltér, az IGS/NGS modellektől az eltérés mértéke 4 mm. A fáziscentrum ingadozások eltérése műholdirányú távolság-korrekcióként veendő figyelembe, így hozzájárul az antennák vízszintes koordinátáinak meghatározásához is. Emellett a két antenna fáziscentrum külpontossága is eltér 1-1 mm-rel egymástól. Az abszolút egyedi kalibráció eredményeképpen meghatározott fáziscentrum külpontosságok a KARL és KLOP állomásokon üzembe helyezett TRM29659.00 és a kupolával ellátott TRM22020.00+GP antennára az 1. táblázatban láthatók. Ebből megállapítható, hogy a fáziscentrum külpontosságok eltérése – főként az időjárásvédő kupola miatt a TRM22020.00+GP antenna esetében a több cm-t is elérheti.

Antenna	Frekvencia	Észak	Kelet	Vertikális
TRM29659.00 KARL ABS->REL	L1	0,0	0,0	111,0
	L2	-1,0	0,0	127,0
TRM29659.00 KLOP ABS->REL	L1	-1,0	0,0	111,0
	L2	0,0	1,0	128,0
TRM22020.00+GP DOME ABS->REL	L1	-0,1	-0,6	74,2
	L2	-0,5	2,8	70,5
TRM29659.00 NGS	L1	1,2	0,5	109,8
	L2	1,2	0,6	128,0
TRM22020.00+GP NGS	L1	1,0	-1,0	90,0
	L2	-2,0	2,0	73,0

1. táblázat KARL és KLOP állomásokon üzembe helyezett azonos típusú antennák egyedileg meghatározott fáziscentrum külpontosságainak különbsége

A 3-8. táblázatban látható, hogy mind az EPN, mind pedig a saját egy-egy hetes feldolgozás hasonló mértékű látszólagos koordinátaváltozást mutat a vizsgált állomásokon. Ha ezeket az értékeket összevetjük a 3-7. táblázatban az 1112-1114 heti ellentmondások különbségeivel, akkor jól látható, hogy az abszolút, egyedi kalibrációval levezetett koordinátamegoldások változása pontosan megegyezik ezekkel az értékekkel. Ebből arra következtethetünk, hogy a 3-8. táblázatban szereplő látszólagos koordinátaváltozások elsődleges oka, az antennák fáziscentrumának modelljeiben keresendő.

VII. Természetesen egyetérték azzal a megállapítással, hogy az abszolút fáziscentrum modellek relatív modellekké transzformálása pontosságvesztéssel jár. Ennek mértékét külön nem vizsgáltam, de

véleményem szerint a hiba mértéke jóval kisebb, mint az eleve relatív antennakalibrálással, sok esetben időjárásvédő kupolák hatását elhanyagolva előállított relatív antennamodellek pontatlansága.

A bemutatott vizsgálatok során kizárólag abszolút értelmű fáziscentrum modellek alkalmazására nem volt lehetőség, mivel az abszolút kalibrációs eredmények még számos antenna esetében nem álltak rendelkezésre a 2000-es évek elején. A hálózat egyes pontjain ráadásul nem permanens, hanem kampány jellegű mérések voltak. A kampány mérésekhez használt geodéziai GPS/GNSS antennák abszolút kalibrációját sem végeztük el a kalibráció magas költségei miatt.

Még 2019-ben is az IGS állomások kb. 7,5%-a relatív antennakalibrációval vagy időjárásvédő kupola nélküli kalibrációval rendelkezett. Azt is meg kell jegyezni, hogy az abszolút kalibrációval rendelkező antennák jelentős része sem egyedi antennakalibrációt, hanem típus kalibrációt jelent.

Az 1. táblázatban látható, hogy még ugyanazon antennatípus esetén sem feltétlenül azonosak a fáziscentrum külpontosságok és ingadozások, ami óhatatlanul látszólagos koordinátaváltozásokhoz vezet. Mozgásvizsgálatoknál, geodinamikai alkalmazásoknál ezért különösen fontos, hogy az antennákat az egyes vizsgálati pontokon ne változtassuk vagy egyedi abszolút kalibrációval határozzuk meg azok pontos fáziscentrum külpontosságát.

VIII. Köszönöm szépen az észrevételt a (3-3) egyenlettel kapcsolatosan, valóban egy 2-s index lemaradt az egyenletből, az egyenlet helyesen:

$$A_f = \begin{pmatrix} A_{fs1} & A_{o1} & 0 & D_1 & 0 \\ A_{fs2} & 0 & A_{o2} & 0 & D_2 \end{pmatrix}.$$

Az eljárás több időpontra is kiterjeszhető, ehhez a (3-3) egyenletet egy-egy további sorral és két-két oszloppal kell kiegészítenünk, amelyekben a harmadik epochára vonatkozó referencia, illetve a mozgásvizsgálati pontok alakmátrixának összetevőit, valamint a dátumparaméterek alakmátrixát adjuk meg. Természetesen ebben az esetben a meghatározandó paraméterek száma is nő, hiszen a harmadik epochában is a közös dátumban meg kell határozzuk a mozgásvizsgálati pontok transzformált koordinátáit.

IX. Egyetértek azzal a megállapítással, hogy ideális esetben valóban a mozdulatlanak tekinthető referenciapontok körülölelik a vizsgált területet, de nagyobb léptékű tektonikai mozgások meghatározása esetén a referenciapontok mozdulatlansága a tektonikai egységes deformációi és elmozdulásai miatt már nem biztosítható. Emiatt választottam a három fő egység (Fekete-erdő, Rajna-árok, Vogézek) közül az árok keleti oldalán elhelyezkedő állomásokat. Ezek közül is a felhasznált 3 állomás bizonyult mozdulatlanak a vizsgált időszakban, amit statisztikai vizsgálatokkal ellenőriztem.

Az eltérő megbízhatóság értékek magyarázata abban rejlik, hogy a hálózatban vegyesen voltak permanens GNSS állomások és kampány jellegű mérések. Szervezési nehézségek miatt a kampány jellegű méréseket is csak országonként hangolták össze. Bár a kampány jellegű mérések csupán 2×24 órás mérések voltak, a kis mértékben eltérő időpontok miatt egy 2-3 hetes mérési időszakokat kellett feldolgozni. A permanens GNSS állomások adatait az egész időszakra feldolgoztam. Az eltérő hosszúságú észlelések miatt a nagyobb hibaellipszisek a kampány jellegű méréssel meghatározott állomásokra vonatkoznak, míg a kisebbek a permanens állomásokhoz tartoznak.

X. Való igaz, hogy az alkalmazott eljárás korlátozottan alkalmas az eltolódások, dölések vagy éppen a szintezési alappontok instabilitásából eredő magasságkülönbség változások megkülönböztetésére. Mivel nagyon részletes, hálózatot alkotó szintezési vonalak nem álltak rendelkezésre ehhez a vizsgálathoz, ezért az adatok elemzése nehezen algoritmizálható. Az eljárás sokkal inkább alkalmas esetleges elmozdulások kizárására, mint a konkrét elmozdulások teljes mértékű detektálására. Ugyanakkor a különböző szintezési vonalakat a törésvonalak helyzetével összevetve és ezekre a területekre koncentrálna a 3-19. ábrán összegezett eredményekből már véleményem szerint levonható következtetés. A Fő Határoló vető mentén több helyen is hasonló mértékű elmozdulást valószínűsítenek

a szintezési adatok, ami arra utal, hogy ezek az elmozdulások nem a szintezési alappontok instabilitására vezethető vissza.

A blokkok dőlését külön nem vizsgáltam. Egyetértek, hogy normalizálással lehetett volna döléseket is kimutatni. A 3-15-ös ábrán a Lehen-Schönberg és a Weinstetten vető között dőlésre is utaló magasságváltozásokat látunk. Ugyanakkor a nagymértékű, rövid távolságon megvalósuló magasságváltozások a vetők helyzetével esnek egybe, így ezek az elmozdulások egyértelműen beazonosíthatók.

XI. Köszönöm az észrevételt.

XII. Egyetértek a megjegyzéssel.

XIII. A permanens állomások koordináta idősoraiban tapasztalható periodikus változások és a villódzás (flicker noise) jelenlétét több, a GNSS méréseket és az állomások helyzetét befolyásoló tényező okozhatja.

Periodikus, jellemzően éves, féléves periódussal jelentkező hatásokat elsősorban geofizikai okokra vezethetjük vissza. Árapályhatások, a Földi tömegátrendeződések a légkörben, az óceánokban és a vízkészletekben (pl. légköri vízpára mennyiségének szezonális változásai, állomások környezetében a földalatti vízkészletek tömegváltozása) adják az egyik legnagyobb hozzájárulást a periodikus tagokhoz. Hasonló hatást fejthetnek ki az állomások környezetében található fák lombkoronájának szezonális változásai a többutas terjedésen keresztül vagy éppen az antennatartó szerkezetek/építmények hőtágulásából eredő magasságváltozások.

A villódzás ezzel szemben jellemzően olyan nagyobb léptékű atmoszférikus és hidrológiai hatások következménye, amelyeket az adatfeldolgozás során alkalmazott modellek nem vettek kellő mértékben figyelembe vagy akár el is hanyagolták azokat.

XIV. A lokális Euler pólust azért alkalmaztam, mert bár az irodalomban többen is meghatározták az Eurázsiai-lemez merev testként végzett mozgásának leírását jellemző Euler pólust és elfordulást, a vizsgálataim egy ennél jóval kisebb méretű területre terjedtek ki. Annak érdekében, hogy a vizsgált terület egészére jellemző elmozdulást és elfordulást teljes egészében ki tudjam küszöbölni és valóban a lemezen belüli deformációk leírására leginkább alkalmas relatív sebességmezőt hozzak létre, ezért egy lokális Euler pólus meghatározása mellett döntöttem. Érdekességként azonban elvégeztem ugyanezt a számítást Altamimi és mtsai. (2016) által, az ITRF2014 vonatkoztatási rendszerhez publikált Euler pólus felhasználásával is. A két sebességmező között az északi és keleti sebességkomponensben mintegy 0,1-0,1 mm-es közepes eltérést tapasztaltam, az eltérések szórása pedig ± 5 és ± 6 ezredmm/év nagyságú volt a két koordinátakomponensre. Az eltérések kicsiny szórása arra utal, hogy a régió merev testként végzett mozgását az egész Eurázsiai lemezre meghatározott Euler pólus alkalmazása kevésbé jól modellezi, a becült sebességmezőt ezáltal szabályos hiba terheli.

Ha a közepes eltéréseket összevetjük a 3-15. táblázatban található értékek nagyságrendjével, akkor láthatjuk, hogy a jellemzően néhány tizedmm/év sebességű felszínmozgásokhoz képest jelentősnek tekinthető ez a szabályos hiba, ezért mindenképpen indokoltnak tartom a lokális Euler pólus becslését ebben az esetben.

XV. A StrainTool szoftverrel a relatív sebességmezőből egy homogén rács pontjaira a (3-21) összefüggés segítségével határoztam meg a kétdimenziós deformációs tenzor elemeit az észak-kelet tájolású koordináterendszerben. A szoftver ezekből kiszámítja a deformációs tenzor sajátértékeit, azok irányát, a maximális nyírási deformáció, a dilatáció és a tenzor második invariánsának értékeit. Ezek a mennyiségek azonban értelemszerűen nem függetlenek egymástól. Ily módon véleményem szerint a 325. ábrán látható sajátértékek és azok iránya jól mutatja a felszín vízszintes értelmű deformációját.

Csupán a deformációs tenzor sajátértékeinek nagysága és iránya alapján véleményem szerint nehéz megítélni az alakváltozást rugalmas jellegét. A tenzor sajátértékei jellemzően legfeljebb 4-5 nm/m/év

nagyságúak. A Felső Rajna-árok alapkőzetét gneiss és gránit alkotja, amelyek kompressziós környezetben akár 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ deformációt is képesek rugalmas alakváltozás mellett elviselni. A GNSS adatokból látható évi 4-5 nm/m -es deformáció nagyságrendekkel alacsonyabb, mint ez az érték. Ezek alapján azonban nem jelenthető ki egyértelműen, hogy csak rugalmas deformáció megy végbe a Felső Rajna-árok területén, hiszen az még számos egyéb paraméter függvénye, úgy mint az idő, a már korábban kialakult vetők megléte, azok iránya, dőlésszöge, stb. Ennek köszönhető, hogy a mozgásmező és a térségben kipattant földrengések fészekmechanizmusai is oldalvetők menti aktivitásra utalnak.

Az alkalmazott Shen-féle interpolációs algoritmus valóban valamennyire összemossa a relatív sebességmezőben látható jellegzetességeket. Ugyanakkor van egy komoly előnye is az interpolációnak. A felhasznált permanens GNSS állomások jellemzően épületek tetején helyezkednek el, ezáltal nem kizárólag az alapkőzet mozgásait jellemzik a meghatározott mozgássebességek. E tekintetben hasznos több permanens állomás sebességéből interpolálva meghatározni a deformációs mezőt, mert ebből a térség egészét jobban jellemző mező számítható.

XVI. Köszönöm az észrevételt, valóban a (4-3) egyenletben a zárójelben szereplő második tag együttthatója helyesen k_1/k_2 és nem k_1 .

XVII. A 4-13 és 4-14 képletekben valóban hiányzik a c változó egy elírás miatt. A (4-14) képlet helyesen:

$$d = \frac{g}{0,0065c}$$

A 4-2. táblázat és a 4-1. táblázat adatainak összevetéséből valóban az látszik, hogy a 4-2. táblázat első sora a rádiószondás mérésekből meghatározott integrált vízgőztartalom értékeket, míg az alatta lévő két sor a GNSS adatokból becsült értékek és a rádiószondás eredmények különbségeinek a statisztikai jellemzőit mutatja be. Erre a táblázat – hosszú, és így talán félreérthető – címsora utal: „A 2006. augusztus 19-21. közötti időszakban végzett rádiószondás integrált vízgőztartalom meghatározás (*felső sor*) és a GNSS alapú meghatározások maradék ellentmondásainak statisztikai jellemzői (*alsó sorok*). Az egyértelműség kedvéért a válaszomban zárójelben tett magyarázatokkal ki kellett volna egészítenem a táblázat címét.

XVIII. A szomszédos légrétegek késleltetésének összegzése során a magassági hibák korrelációjára vonatkozóan nem végeztem vizsgálatokat, azokat – bár tudjuk, hogy hibával terheltek – hibátlannak tételeztem fel.

XIX. Egyetértek a megjegyzéssel.

XX. A T_m valóban jól definiálható mennyiség, azonban meghatározásához ismernünk kell a teljes légoszlopban a vízgőzsűrűség és a hőmérséklet változását. Ez az információ a GNSS állomások közelében ritkán áll rendelkezésünkre. Ily módon a (4-9) egyenlet helyett egy könnyen mérhető meteorológiai paraméter függvényében becsüljük a T_m vagy a Q^{-1} tényező értékét. A kérdés e becslési eljárás pontosságának a térbeli és szezonális változásaira irányul. E tekintetben két vizsgálatot hajtottunk végre. A T_m paraméter becsléséhez felhasznált regressziós egyenes paramétereinek évszakos változásait vizsgáltuk meg a (Rózsa és mtsai., 2009) cikkünkben. Budapesten 10 115 rádiószonda észlelést felhasználva határoztuk meg a T_m-T_s lineáris függvény együttthatóit az év egyes hónapjaira. Eredményeink azt mutatták, hogy a havi függvények maradék ellentmondásainak szórása az év folyamán $\pm 2,75$ - $3,39$ K között változtak, míg a szezonális hatások elhanyagolása esetén ez az érték $\pm 3,21$ K volt. Emellett a regressziós egyenes paraméterei (a , b) szezonális változásokat mutattak. Az egyenes meredeksége a nyári hónapokban mintegy 30%-kal alacsonyabb volt mint a téli hónapokban (2. táblázat).

A regressziós egyenesek paramétereinek földrajzi helytől való függését Juni és Rózsa (2018) vizsgálta. E tanulmányban egy 10 éves időszak numerikus időjárás modelladatainak felhasználásával vezettük le a regressziós egyenes paramétereit egy globális rács pontjaira, majd azt összevetettük az észak-amerikai

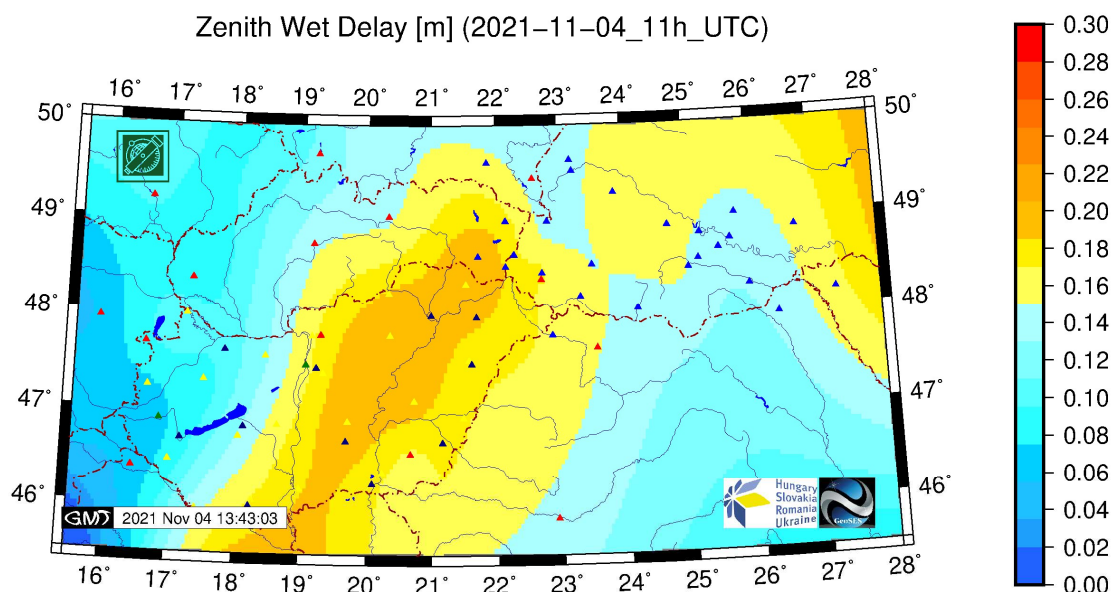
rádiószondás adatokból levezetett Bevis-féle összefüggéssel (Bevis és mtsai., 1992) egy további 6 éves időszak numerikus időjárási modelladatait referenciaként felhasználva. Megállapításaink szerint a közepes szélességeken az eredeti Bevis modell is hasonló teljesítményt nyújtott a közepes eltérést és a szórást tekintve. A trópusokon és a magasabb szélességi tartományokban néhány %-os javulást tapasztaltunk a középértékek tekintetében, míg a maradék ellentmondások szórása nem változott érdemben.

Hónap	a	b	R ²	σ	N
1	0,531	267,1	0,37	3,16	849
2	0,610	265,7	0,49	3,39	787
3	0,596	265,4	0,50	3,03	862
4	0,614	265,5	0,58	2,88	837
5	0,510	269,3	0,48	2,86	847
6	0,508	270,6	0,45	2,99	828
7	0,449	272,5	0,41	2,75	864
8	0,426	273,5	0,41	2,75	857
9	0,480	270,5	0,41	2,84	831
10	0,610	268,3	0,54	3,07	865
11	0,651	267,1	0,55	2,92	829
12	0,567	266,8	0,40	3,09	859
Év	0,675	266,6	0,80	3,21	10115

2. táblázat. A felszíni hőmérséklet (°C) és a vízgőz átlagos hőmérséklete (K) közötti regressziós egyenesek paramétereit, illetve azok statisztikai jellemzőit (Rózsa és mtsai. (2009) nyomán).

XXI. Köszönöm a megjegyzést.

XXII. A zenitirányú troposzférikus késleltetés időjárási frontok környezetében jelentősen eltérő értéket vehet fel. Egy jó példa erre a 2021. november 4-i hidegfront betörése hazánkba, amikor a keleti és a nyugati országrész között zenitirányban 8-10 cm-rel eltérő nedves késleltetés alakult ki. Az 1. ábrán jól látható, hogy 50-100 km-es távolságban vertikális értelemben akár 4-6 cm-es eltérés is kialakulhat késleltetésekben, amelyek elsősorban a magassági koordináták meghatározását érintik hátrányosan. A relatív helymeghatározás során azzal a feltételezéssel élünk, hogy a referenciaállomások és a mozgó vevőkön is hasonló mértékű a légoszlopban található vízgőz mennyisége és ennek megfelelően a késleltetések is azonosak. Ezek alapján kijelenthető, hogy akár több cm-rel is ronthatja a troposzféra a helymeghatározás pontosságát hosszabb bázisvonalak esetén.



1. ábra Zenitirányú nedves troposzférikus késleltetés értéke Magyarországon 2021. november 4-én közel valós idejű GNSS adatok feldolgozásából.

Meg kell azonban jegyezni, hogy a korszerű hálózati RTK megoldások a szabályos hibákat, így a troposzféra okozta késleltetéseket is minden állomáson külön-külön határozzák meg és a szabályos hibák modelljeit a felhasználók számára továbbítják vagy a virtuális referenciaállomás adatok előállításánál figyelembe veszik. Ily módon ezen hálózatok esetén a hiba mértéke is jelentősen csökkenhet az előbb említett értékhez képest.

XXIII. Ezekben a vizsgálatokban az RTCA troposzféra modellt vettem össze az Askne-Nordius modellel. Utóbbi értékét kétféle módon meghatározott meteorológiai paraméterekkel határoztam meg, az egyik esetben a GPT2 globális hőmérséklet, légnyomás és parciális párányomás felszínközeli értékeit leíró paramétereket használtam, míg a másik esetben egy kibővített paraméterkészletet alkalmaztam, amelyben a hőmérséklet, légnyomás és a parciális párányomás mellett a hőmérsékleti gradiens (α) és a parciális párányomás exponenciális változását leíró λ tényezőt is rádiószondás mérések felhasználásával becsültem. Fontos megjegyezni, hogy a GPT2 modell utóbbi két tényezőre (α és λ) nem ad információt, így a GPT2-t az RTCA modell α és λ értékeivel egészítettem ki.

A ZHD értékek esetén az RTCA modellhez képest a mind a GPT2, mind a LOC modell jobban teljesített, mind a közepes eltérések, mind pedig a szórások tekintetében. A GPT2 valóban valamelyest kisebb közepes eltérést mutatott (abszolút értékben mintegy 1,5 mm-re), de ez elhanyagolható eltérés a hidrosztatikus késleltetések jellemzően 2,2 méteres nagyságrendjéhez képest. Az eltérés oka lehet, hogy a felszínközeli légnyomás éves változását leíró függvényt a GPT2 és a LOC modell esetében alapvetően hasonló eljárással, de eltérő adatok felhasználásával határozták meg. Ily módon az eltérés egyik magyarázata lehet az eltérő adatforrás hatása.

Meg kell azonban említeni, a hidrosztatikus késleltetéshez képest a légköri vízpára okozta nedves késleltetés nehezebben becsülhető, így módon a vizsgálatok sokkal inkább az értekezés 5-3. táblázatában szereplő zenitirányú nedves késleltetésekre irányultak, hiszen mind a hőmérsékleti gradiens, mind pedig a parciális párányomás változását leíró λ tényezőt a nedves késleltetés becslése során vesszük figyelembe. Az 5.3 táblázatban az látható, hogy az RTCA modellhez képest jelentősen sikerült a maradék ellentmondások közepes eltérését csökkenteni. Ennek elsődleges oka, hogy az α és λ tényező földrajzi helyre jellemző értékeinek becslésével finomítottam a nedves késleltetés meghatározását.

XXIV. A troposzférikus késleltetés becslésében tapasztalt maradék ellentmondások szélsőséges mértékű hibáinak konkrét okait nem vizsgáltam. A hidrológiában és a meteorológiában azonban már régóta ismert, hogy a meteorológiai paraméterek szélsőséges értékei csakúgy, mint a vízállások szélsőséges értékei az extrémérték elmélet alapján definiált eloszlásokat követik. Ezen szélsőséges értékeknek döntően természeti okai vannak. A szélsőséges időjárási helyzetek, például heves zivatarok esetén a troposzféra okozta késleltetés jelentősen eltérhet a modellekben reprezentált sztenderd atmoszférára levezetett értékektől.

Mivel az életbiztonságra kritikus GNSS alkalmazások szempontjából nagyon kis valószínűség mellett (10^{-7}) előforduló modellhibák számszerűsítését kell elvégeznünk, ezért elengedhetetlen, hogy kellően hosszú, konzisztens, globális lefedettségű meteorológiai adatsorokat használjunk a modellhibák meghatározásához. Ez azonban óriási adatmennyiséget jelent, így a számításokat és az adatfeldolgozást automatizálni kell. Vizsgálataimnak e fázisában nem volt célja a modellhibák okainak felderítése. Ez a szélsőséges modellhibák nagyszámú légköri profiljának az elemzését igényelte volna. E helyett a modellhibák szélsőséges körülmények között kialakuló mértékét kívántam számszerűsíteni a légi navigáció számára. Földtudományi szempontból azonban kétségkívül érdekes kérdés, hogy a troposzféra modellek miként fejleszthetők tovább annak érdekében, hogy esetleg azok szélsőséges körülmények között is kisebb maradék hibát eredményezzenek. Ez azonban túlmutat ezen MTA értekezés keretein, de a jövőre nézve mindenképpen érdekes problémafelvetésnek gondolom, így szeretném mélyebb elemzés alá venni a szélsőséges modellhibákhoz tartozó légköri profilokat. Más meteorológiai paramétereket is bevonva a vizsgálatba (pl. légköri víz, jég) elképzelhetőnek tartom, hogy a troposzférikus késleltetés modellek tovább finomíthatók.

XXV. (a bírálatban a második XXIV.)

Egyetértek a bíráló megjegyzésével arra vonatkozóan, hogy az (5-31) egyenletben a d_{KE}^2 változó definíciója pontosabban megfogalmazva a keleti és északi koordinátatengely mentén értelmezett hibaeloszlások kovarianciája.

Az ionoszféra okozta sebességmódosító hatást a műholdas kiegészítő rendszerekkel segített helymeghatározás esetén nem a kétfrekvenciás észlelések lineáris kombinációjával, hanem a korrekciós üzenetekben sugárzott ionoszféra rácsra megadott, a földi követőállomások méréseiből levezetett függőleges irányú, L_1 frekvenciára vonatkozó késleltetés értékével veszik figyelembe. A sugárzott üzenetben minden egyes rácspontra megadják nem csak az L_1 frekvenciára vonatkozó ionoszférikus késleltetés mértékét, hanem az azok középhibájára utaló pontossági osztályt is (GIVEI: Grid Ionospheric Vertical Error Indicator). A GIVEI 0-15-ig vehet fel értékeket, ezek határozzák meg a vertikális ionoszférikus késleltetés varianciáját ($\sigma_{I,GIVE}^2$) m^2 egységben. Lupsic és Takács (2019) megvizsgálta az EGNOS rendszer által szolgáltatott ionoszféra korrekciók hatását a helymeghatározási szolgáltatás integritására. Vizsgálatuk kimutatta, hogy az ionoszféra modell nagyságrendileg 4-5 TECU középhibával jellemezhető, ami távmérési eredményre skálázva megközelítőleg 60-80 cm-es középhibának felel meg. Ily módon az egyfrekvenciás mérések esetén a légköri hatások tekintetében az ionoszféra jelentősebb hozzájárulást ad a védelmi szintekhez, mint a troposzféra. Ugyanakkor Hoque és Jakowski (2007) kimutatta, hogy a másod és harmadrendű tagok távolságmérésre vetített hatása már cm-es nagyságrendű, így a kétfrekvenciás észlelések lineáris kombinációját már csak ilyen nagyságrendű hatások terhelik. Mivel a troposzférikus késleltetés maradék hibáját $\pm 0,12$ m szórású normális eloszlású valószínűségi változóként adja meg az RTCA szabvány, így az ionoszféra mentes lineáris kombináció esetében a troposzférikus késleltetés modellhibáinak már jelentősebb a hatása, mint az ionoszférikus késleltetések magasabb rendű tagjaié.

XXVI. (a bírálatban az első XXV. számú kérdés)

Az RTCA szabvány szerint a 3D helymeghatározás vízszintes és magassági értelemben vett maradékhibákra adott valószínűségi szint mellett definiálható konfidenciaintervallumot határozunk meg annak érdekében, hogy a becsült pozíció körül egy olyan térrészt határozhassunk meg, amelyben a mozgó platform (repülőgép, gépjármű, stb.) nagy valószínűséggel elhelyezkedik. A számítás menete, hogy a helymeghatározás megoldásához felhasznált térbeli derékszögű, geocentrikus elhelyezkedésű vonatkoztatási rendszerben meghatározzuk a háromdimenziós koordináták variancia-kovariancia

mátrixát. Egyetértek a bíráló megállapításával, hogy e variancia-kovariancia mátrix sajátértéke nem feltétlenül a topocentrikus koordinátarendszer tengelyeinek irányába esnek. Ugyanakkor az is tény, hogy a helymeghatározás során a koordináták magassági értelmű hibái többszöröse a vízszintes értelmű hibáknak. Ennek oka egyrészt a geometriában rejlik, hiszen a műholdak a horizont felett helyezkednek el. Másrészt a szabályos hibák is elsősorban a magassági koordinátakomponensek meghatározását befolyásolják hátrányosan. Ily módon a legnagyobb sajátérték – ha nem is pontosan – de közel a helyi függőleges irányába mutat, míg a másik kettő közel a vízszintes síkban van.

Ezen elgondolás alapján – ha nem is szabatos az RTCA által alkalmazott megoldás – a gyakorlati alkalmazások szempontjából jó közelítéssel valósítja meg a megfelelő konfidenciaintervallum meghatározását. Az értekezésben bemutatott vizsgálatok a troposzférikus késleltetések esetében igazolták, hogy a becsült késleltetések tapasztalt hibái mindig a konfidencia intervallumon belül maradtak. Ily módon a szabvány által megadott eljárás konzervatív módon jelzi előre a legnagyobb helymeghatározási hibákat, így jól alkalmazható az életbiztonságra kritikus helymeghatározási alkalmazások terén.

XXVII. (a bírálóban a második XXV. számú kérdés)

Ahogy a XXV. pontban leírt válaszomban részleteztem, a jelenlegi széles körben alkalmazott gyakorlat szerint egyfrekvenciás mérések felhasználásával végezzük el a helymeghatározást a műholdas kiegészítő rendszerek (SBAS) korrekcióinak felhasználásával és az ionoszférikus késleltetés hatását a sugárzott korrekciókkal vesszük figyelembe. Mivel ezeknek – tapasztalataink szerint – a zenit irányú középhibája a távolságra vetítve $\pm 0,6-0,8$ méter nagyságrendű, így az ionoszférikus hatások maradék hibái jelentősen nagyobbak, mint a $\pm 0,12$ méter – vagy az újonnan kifejlesztett modelleknél még akár helyenként ennél is alacsonyabb – középhibával jellemezhető maradék troposzférikus késleltetés hibák hatása a védelmi szintekre.

Ennek fényében helyesnek tartom azt a megállapítást, hogy az életbiztonságra kritikus alkalmazásoknál – ellentétben az extrém meteorológiai körülményekkel – a troposzférikus késleltetés modellek kevésbé „veszélyesek”, mint az ionoszférikus késleltetés modellek. Ugyanakkor ez a helyzet megváltozhat, ha legalább két frekvencián végezhetünk kód méréses távolságmeghatározást a polgári célra fejlesztett vevőkkel, hiszen ebben az esetben az ionoszféra okozta késleltetés jelentős része kiejthető. Meg kell azonban jegyezni, hogy ebben az esetben a lineáris kombináció zajosabbá válik, ami kedvezőtlenül befolyásolhatja a helymeghatározás pontosságát.

Budapest, 2022. szeptember 16.



Rózsa Szabolcs
habilitált egyetemi docens

Felhasznált irodalom

- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., & Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(8). <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>
- Bassiri, S., & Hajj, G. A. (1993). Higher-order ionospheric effects on the global positioning system observables and means of modeling them. *manuscripta geodaetica*, 18.
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., & Ware, R. H. (1992). GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *Journal of Geophysical Research*, 97(D14). <https://doi.org/10.1029/92jd01517>
- Hoque, M. M., & Jakowski, N. (2007). Higher order ionospheric effects in precise GNSS positioning. *Journal of Geodesy*, 81(4). <https://doi.org/10.1007/s00190-006-0106-0>

- Juni, I., & Rózsa, S. (2018). Developing a global model for the conversion of zenith wet tropospheric delays to integrated water vapour. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 53(2).
<https://doi.org/10.1007/s40328-018-0215-2>
- Lupsic, B., & Takács, B. (2019). ANALYSIS of the EGNOS IONOSPHERIC MODEL and ITS IMPACT on the INTEGRITY LEVEL in the CENTRAL EASTERN EUROPE REGION. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(4/W14). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W14-159-2019>
- Rózsa, S., Dombai, F., Németh, P., & Ablonczy, D. (2009). Integrált vízgőztartalom becslése GPS adatok alapján. *Geomatikai Közlemények*, 12(1), 187–196.