

Szabatos abszolút helymeghatározás valós időben Real-Time Precise Point Positioning

Dr. TAKÁCS Bence

Általános- és Felsőgeodézia Tanszék, Építőmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
1111 Budapest Műgyetem rakpart 3.

+36-30-257-8981, takacs.bence@emk.bme.hu, <https://geod.bme.hu/>

Abstract

Real-Time Precise Point Positioning (RT-PPP) is a technique that uses corrections for satellite orbits, clocks, and atmospheric delays in real-time to achieve centimetre-level positioning accuracy from a single Global Navigation Satellite System (GNSS) receiver. It is an advancement over traditional methods by eliminating the need for local reference stations and enabling rapid, high-precision location services globally in a wide variety of fields, such as autonomous driving.

Keywords: phase ranging, satellite orbit and clock models, initialisation time, accuracy monitoring

Kivonat

A valós idejű szabatos abszolút helymeghatározás egy olyan technika, amely a műholdak pálya- és órahibáit, a légkör jelkésleltető hatását precíz modellek alapján veszi figyelembe, és így néhány centiméteres pontosságot biztosít egyetlen vevővel. A geodéziában elterjedt valós idejű, relatív helymeghatározás alternatívája, miközben kevesebb referenciaállomás segítségével biztosít hasonló pontosságot globális lefedettséggel. A módszert számos területen alkalmazzák, például önvezető járművek navigációja.

Kulcsszavak: fázismérés, pálya és órahiba modellek, inicializálási idő, pontosság monitoring

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt években a geodéziában megszoktuk, hogy RTK (Real-Time Kinematic) GNSS-vevőinkkel, pár kattintással, pár perc alatt egy néhány cm pontossággal tudjuk egy-egy pont térbeli pozícióját meghatározni. Ehhez szükséges a háttérben a referenciaállomások sűrű hálózata, a referenciaállomások nyers méréseinek központi feldolgozása és minőségbiztosítása, illetve az adatok és RTK-korrekciók eljuttatása a felhasználóhoz. A kommunikáció már régóta mobil internetszolgáltatáson alapul. RTK-vevőink legegyszerűbb esetben a legközelebbi GNSS-referenciaállomás nyers mérései adatait kapja a szolgáltatótól, a vevő szoftvere képezi a bázis és rover vevők méréseinek kettős különbségét, amely a szabályos hibák hatásától jórészt mentes és számítja, a bázis és rover vevő közötti vektor három komponensét, valamint a ciklustöbbletértékek értékeit. A bázis vevő koordinátái ismertek, így a rover vevő koordinátái is számíthatók. Amennyiben a legközelebbi referenciaállomás 5-10 km-nél messzebb található, akkor már érdemes valamilyen hálózati RTK-megoldást választani. A leggyakrabban alkalmazott módszer szerint a közeleli állomások méréseiből egy úgynevezett virtuális állomás méréseit vezetik le, majd ennek (virtuális) méréseit kapja a rover vevő. Rover vevő oldalán nincs lényegi különbség, hogy a mérések egy fizikailag létező vagy virtuális vevőtől származnak. Ugyanakkor a hálózat oldalán minden egyes virtuális állomás létesítése erőforrást igényel, a felhasználók drasztikus növekedése előbb-utóbb kapacitási problémákat okozhat.

A cm-es pontosság elérése történhet a nyers méréseket terhelő hibák szabályos (elsősorban a műhold pálya-, órahibák, ionoszféra és troposzféra hibák) értékének pontos kiszámítása, modellezése és a mérések megjavítása útján is. A módszer (Precise Point Positioning, PPP) már az 1990-es években is ismert volt, de akkor még csak utófeldolgozással alkalmazták, jórészt a mérések után több napos, vagy akár több hetes késéssel, hiszen a precíz pálya és órahiba modellek 7-10 napos késéssel váltak elérhetővé. Egy pont néhány cm pontos meghatározásához több órányi mérésre volt szükség. Ebben az esetben alapvetően abszolút helymeghatározást végzünk, tehát egyetlen vevővel mérünk, ugyanakkor a háttérben szükség van referenciaállomások méréseire is, hogy a szabályos hibák értékét meg lehessen határozni. Az elmúlt években a szabatos abszolút helymeghatározás sokat fejlődött, a gyakorlatban is elterjedt, elsősorban annak köszönhetően, hogy a szabályos hibákat leíró pontos modellek ma már valós időben is elérhetők. A szabályos

hibák közül a pálya és órahibák meghatározásához jóval kevesebb referenciaállomásra van szükség. A légkör okozta szabályos hibák ezzel szemben erősen helyfüggőek, a légkör okozta hibák modellezéséhez tehát sűrűbb állomáshálózatra van szükség. A gyakorlatban a hálózat sűrítése érdekében a globális szolgáltatók megveszik a lokális (országos) szolgáltatók méréseit. A valós idejű szabatos abszolút helymeghatározás (Real-Time Precise Point Positioning, RT PPP) előnye, hogy egyetlen szolgáltatás lényegében globális lefedettséget biztosít. Ez különösen azoknál az alkalmazásoknál jelent előnyt, amelyeknél egy-egy vevővel országokon átívelő területeken végeznek helymeghatározást, pl. autonóm járművek helymeghatározása esetén. A módszer további előnyének tekinthető, hogy az RT PPP korrekciók adatmennyisége jóval kisebb, mint a hagyományos RTK korrekcióké. Ma már több szolgáltató is kínál valós idejű szabatos abszolút helymeghatározáshoz korrekciókat versenyképes áron.

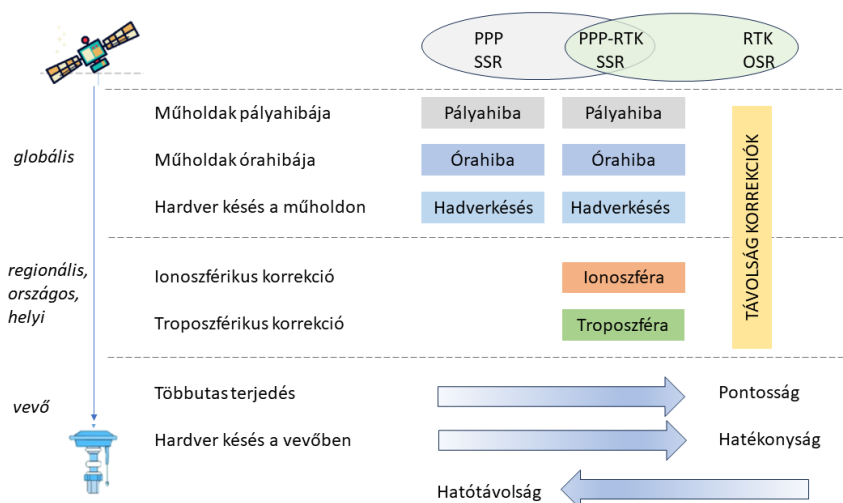
A szabatos abszolút helymeghatározáshoz sugárzott korrekciók globális helymeghatározási szolgáltatás, ebből kifolyólag a korrekciókkal meghatározott koordináták globális vonatkoztatási rendszerben értendők, jelenleg az ITRF2020 rendszerben, mindig az aktuális epochára vonatkozóan. Megjegyezzük, hogy Európában a hagyományos RTK-szolgáltatásokkal meghatározott koordináták vonatkoztatási rendszere jellemzően az európai kontinenssel együtt mozgó vonatkoztatási rendszer, Magyarországon jelenleg az ETRF2000.

Ebben a cikkben bemutatom a valós idejű szabatos abszolút helymeghatározást, valamint saját méréseim és tapasztalataim alapján az egyik globális szolgáltató kínálta korrekciókkal elérhető pontosságot.

2. MÓDSZERTAN

Szabatos abszolút helymeghatározással egyetlen GNSS-vevő abszolút pozícióját a nyers kód és fázismérések feldolgozásával határozzuk meg, ehhez precíz műholdpályák és órahiba modelleket használunk. A kódérések közvetítő egyenlete tartalmazza a vevő és a műhold közötti távolságot, a vevő és a műhold órájának hibáját, a troposzféra és az ionoszféra okozta késéseket, a hardverkésést és a mérési zajt. A fázismérések közvetítő egyenlete kiegészül a ciklustöbbletértéssel. A mérések feldolgozását lényegében nem terheli a műholdak pálya és órahibája, hiszen a precíz pálya és órahiba adatok hibátlannak tekinthetők. Az ionoszféra jelkésleltető hatását több frekvencián végzett mérések megfelelő lineáris kombinációjával ejtjük ki, a troposzféra okozta késés jelentős része pedig elég pontosan modellezhető. A többutas terjedés és a mérési zaj jó minőségű hardverek alkalmazásával és megfelelő mérési helyszín kiválasztásával minimálisra csökkenthető. Számos további, a helymeghatározást terhelő szabályos hibát gondos modellek alkalmazásával vesszük figyelembe, pl. az ár-apály, pólusmozgás, műholdak forgásának hatását, antenna fáziscentrumaik külpontosságát.

A helymeghatározás egyenletrendszerét általában valamilyen Kálmán-szűrővel oldjuk meg. A becslés eredménye a vevő pozíciója, órahibája, a troposzféra nem modellezhető része, a ciklustöbbletértékek értéke, illetve mindezek pontossági mérőszámai. A ciklustöbbletérték értéke első lépésben lebegőpontos szám (float megoldás), de az RTK-mérésekhez hasonlóan rövid idő alatt konvergál a megoldás és a ciklustöbbletértékek egész számként is meghatározhatók (fix megoldás). A fix megoldás elérését nevezzük inicializálásnak.



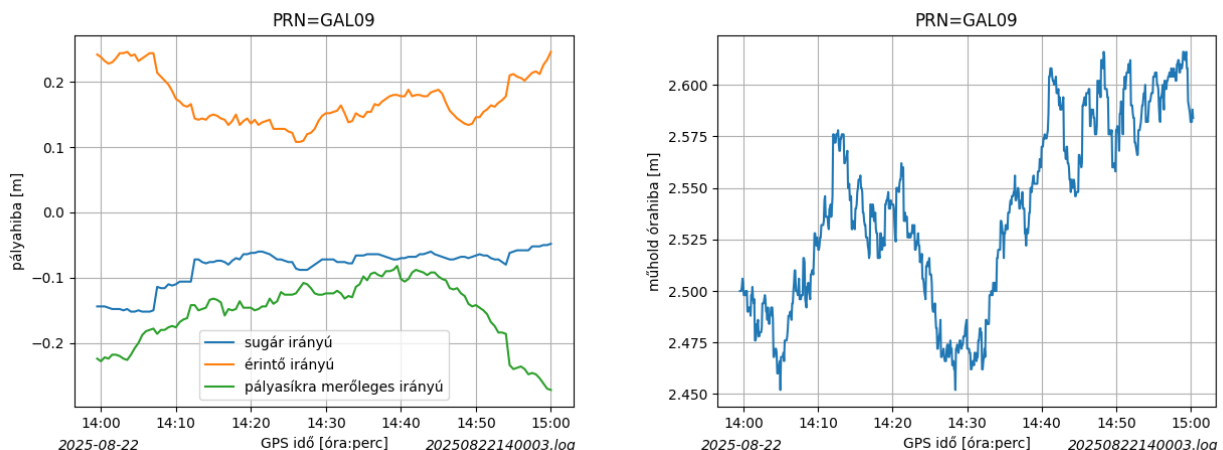
1. ábra. SSR és OSR korrekciók összehasonlítása [3]

A valós idejű alkalmazáshoz a szolgáltatók valós időben sugározzák a műholdak pálya és óra-korrektúráit, vagyis a GNSS-műholdak navigációs adatai között sugárzott, úgynevezett fedélzeti pályaadatokból számítható pálya- és óramodellek hibáit, a kód és fázisméréseket terhelő hardverkésések értékét, valamint ionoszféra és troposzféra modelleket. A szakirodalomban ezeket a korrekciókat nevezik SSR (State Space Representation) korrekcióknak is, megkülönböztetve az OSR (Observation Space Representation) korrekcióktól (1. ábra) [3].

3. ADATOK

A szabatos abszolút helymeghatározáshoz szükséges SSR korrekciókat több szolgáltatótól is beszerezhetjük. Ingyenesen elérhető adatokat biztosít a Nemzetközi GNSS Szolgálat (International GNSS Service, IGS). A korrekciók RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services) formátumban érhetők el. A korrekciókat tartalmazó termékekben vannak kisebb különbségek, pl. mely műholdrendszerek adatait tartalmazzák, a korrekciók a műhold antenna fáziscentrumára vagy esetleg a tömegközéppontjára vonatkoznak, milyen korrekciókat és milyen RTCM üzeneteket tartalmaznak. Regisztráció után az adatok valós időben elérhetők. Az IGS SSR korrekcióival szabatos abszolút helymeghatározás végezhető valós időben a nyílt forráskódú RTKLIB szoftverrel [5]. Sajnos az RTKLIB aktuális verziói PPP üzemmódban nem támogatják a ciklustöbbszámítások egész számként történő feloldását.

A piacon több, kereskedelmi szolgáltatás térítés ellenében érhető el. A szolgáltatás havidíja nagyjából megegyezik a hagyományos RTK-szolgáltatások havidíjával. Az RTCM formátum mellett vannak más formátumok is, pl. a nyílt SPARTN (Safe Position Augmentation for Real-Time Navigation) formátum. Az ingyenes és kereskedelmi szolgáltatásként sugárzott korrekciók tartalma (2. ábra) lényegében azonos, ugyanakkor a modernebb korrekciós formátumok tömörebbek. Összehasonlításképpen a hagyományos RTK-korrekciók RTCM formátumban óránként 3-8 MB mennyiségű adatot, az IGS SSR korrekciók RTCM formátumban óránként 2-5 MB mennyiségű adatot, az egyik kereskedelmi szolgáltató SSR korrekciói SPARTN formátumban óránként kb. 1 MB mennyiségű adatot jelentenek.



2. ábra. Az egyik kereskedelmi szolgáltató SSR korrekciói – példák

Leghatékonyabb helymeghatározást az SSR-korrekciókat támogató vevőkkel érhetjük el, ebben az esetben a vevők beépített szoftvere végzi a helymeghatározáshoz szükséges összes számítást. A hagyományos RTK-vevőkhöz hasonlóan szükséges az internet hozzáférés, a korrekciók letöltéséhez szükséges felhasználó azonosítása felhasználó névvel és jelszóval. A vevő kezelőjén pár kattintással elvégezhetők a szükséges beállítások és a hagyományos RTK-vevőkhöz hasonlóan kapjuk a pozíciókat, de figyelni kell a vonatkoztatási rendszerre.

Az egyik kereskedelmi szolgáltatással elérhető pontosság vizsgálatára saját monitorállomáson végeztem méréseket [5]. A monitor állomáson u-blox f9p, kétfrekvenciás, négykonstellációs GNSS-vevő mért, kompakt antennával. Ezt az RTK-vevőt korábban sikerrel alkalmaztuk több mérnökgeodéziai feladathoz [1]. A monitor állomás Budapest területén található, a mérés körülményei a műholdas helymeghatározás szempontjából ideálisnak tekinthetők. A vevőt egy raspberry pi számítógép vezérelte, linux operációs rendszer alatt. Minden kommunikációhoz és adatgyűjtéshez a nyílt forráskódú RTKLIB str2str programját használtam [5]. A komplex vizsgálat érdekében külön fájlokban rögzítettem az SSR-korrekciókat, a vevő nyers méréseit, valamint a vevő által számított koordinátákat, pontossági mérőszámait és egyéb jellemzőit a vevő saját bináris formátumában. A vevőt a vezérlő számítógép 10 percenként ki/bekapcsolta, kikényszerítve a rendszeres újrainiciálást. A monitoring jellegű vizsgálatához a RPi számítógépen összesen négy str2str program futott

párhuzamosan (1. táblázat). Az adatokat órás periódusú fájlokban tároltam. A bináris formátumú adatok olvasásához és konvertálásához nyílt forráskódú python programokat használtam, ezek közül a legfontosabbak a már többször említett RTKLIB, valamint a pypartn és a pyubx2 projektek programjai [7].

Az adatgyűjtés távlati célja a nyers mérések feldolgozása saját, illetve nyílt forráskódú programokkal, a saját feldolgozás eredményének összehasonlítása a vevő által végzett feldolgozás eredményével, valamint a meghatározott pozíciók pontossága és a sugárzott korrekciók közötti összefüggés megállapítása.

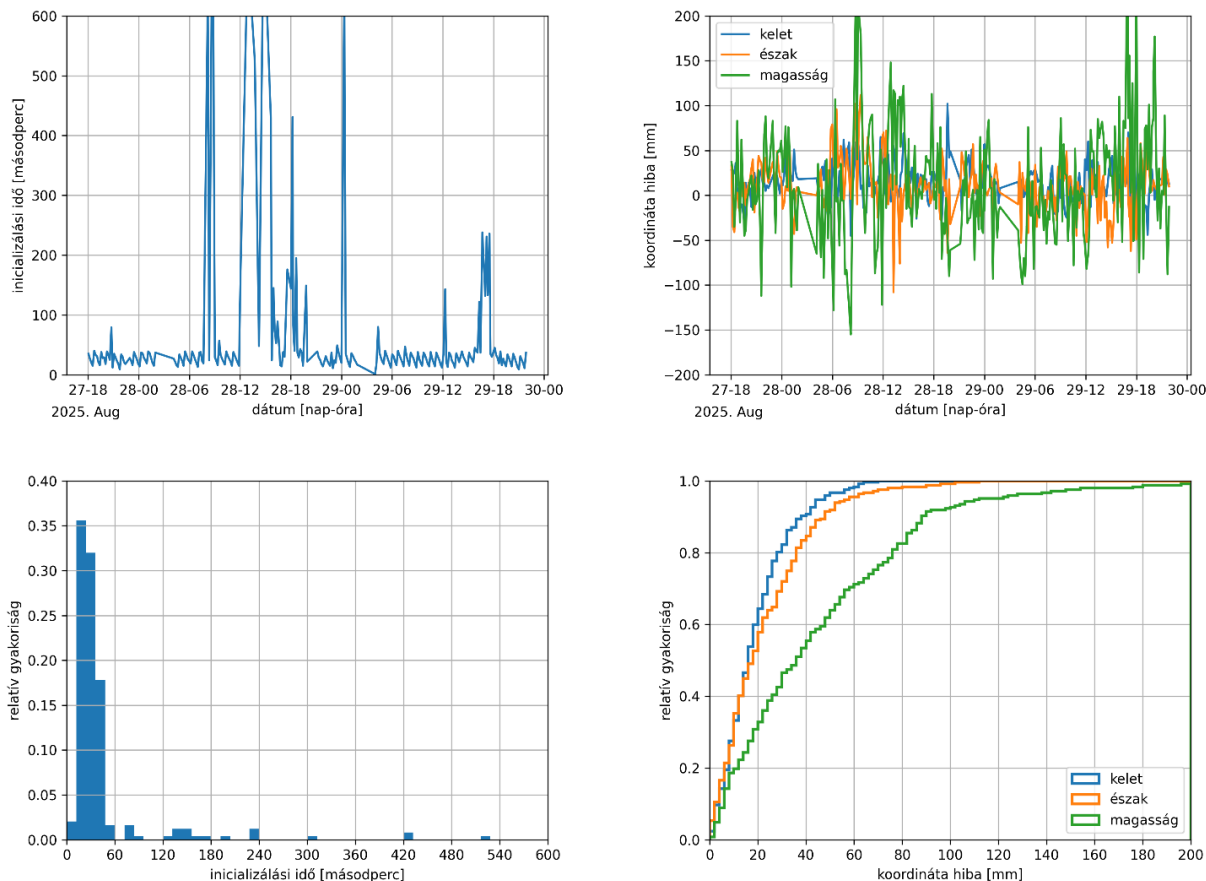
Str2str programok a saját monitor állomáson

1. táblázat

input	output	leírás
ntrip client	TCP server	SSR-korrekciók letöltése
TCP client	file	SSR-korrekciók mentése fájlba
TCP client	serial (ttyACM0)	SSR-korrekciók átadása a vevőnek
serial (ttyUSB0)	file	nyers mérések és pozíció adatok mentése fájlba

4. EREDMÉNYEK

A vizsgálatokat 2025. augusztus 27. 18:00 és augusztus 29. 22:00 között végeztem. Összesen 247 alkalommal inicializált a vevő. Az inicializálási idő az esetek 90 százalékában 60 másodperc alatti, ami nagyjából megfelel, illetve valamelyest elmarad a hagyományos RTK-mérések inicializálási idejétől [2], [4], [6]. Inicializálás után 2 perces periódusokban számítottam a meghatározott koordináták és magasságok átlagát, amelyek hibái vízszintes értelemben jellemzően 6 cm, magassági értelemben 20 cm alattiak. A jelentősebb hibák mindkét vizsgálati napon napközben figyelhetők meg, feltehetően az ionoszférikus aktivitás okozza (3. ábra).



3. ábra. SSR-korrekciókkal végzett inicializálási idő és a helymeghatározás hibái

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a cikkben bemutattam a valós idejű, szabatos helymeghatározás alapelvét, az egyik kereskedelmi szolgáltató korrekcióit, valamint a saját monitorállomásomon végzett pontosságvizsgálataim eredményeit. Megállapítható, hogy az inicializálási idő az esetek mintegy 90 százalékában megfelel a hagyományos RTK-mérések inicializálási idejének. Két perces periódusokban mérve a pontosság vízszintes értelemben 6 cm alatti, ez az érték kis mértékben elmarad a hagyományos RTK-mérések során tapasztalt pontosságtól [2], [4], [6], de megegyezik a szolgáltató által megadott értékkel. Az inicializálási idő és a pontosság függ a légkör állapotát leíró modellek pontosságától, ezeknek a modelleknek a pontossága a referenciaállomások sűrítésével, valamint a légköri modellek paramétereinek finomításával várhatóan javulni fog a jövőben. A szabatos abszolút helymeghatározás már most is tekinthető a hagyományos RTK-technológia alternatívájának, használható akár a földmérés területén is. Alkalmazása különösen előnyös olyan országokban, ahol nem érhető el RTK korrekciós szolgáltatás.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezt a kutatást az Innovációs és Kulturális Minisztérium, valamint a Nemzeti Kutatási- Fejlesztési és Innovációs Hivatal a Kooperatív Technológiák Nemzeti Laboratórium (2022-2.1.1-NL-2022-00012) projekt keretében támogatta.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Égető Cs, Siki Z, Turák B, Rózsa Sz: *Low-cost GNSS sensor development for structural monitoring*. 2021. Buletin Stiintific Al Universitatii De Nord Baia Mare Seria D Exploatari Miniere, Prepararea Substantelor Minerale Utile, Metalurgie Neferoasa, Geologie Si Ingineria Mediului
- [2] Forgó Z.: *GNSS-mérési módszerek megbízhatóságának vizsgálata*, Geodézia és Kartográfia, 2023, 75(1), 24–28. <https://doi.org/10.30921/GK.75.2023.1.3>
- [3] Li X., Huang, J Li X. et al. *Review of PPP–RTK: achievements, challenges, and opportunities*. 2022. Satellite Navigation 28(3). <https://doi.org/10.1186/s43020-022-00089-9>
- [4] Robustelli U, Cutugno M, Pugliano G.: *Low-Cost GNSS and PPP-RTK: Investigating the Capabilities of the u-blox ZED-F9P Module*, Sensors, 2023, 23(13):6074. <https://doi.org/10.3390/s23136074>
- [5] Takasu, Tomoji 2009: *RTKLIB: Open Source Program Package for RTK-GPS*. FOSS4G 2009 Tokyo, Japan
- [6] Takács B.: *RTK-mérések pontossága és hatékonysága*, Geodézia és Kartográfia, 2025, 77(1), 18-23. <https://doi.org/10.30921/GK.77.2025.1.3>
- [7] *** *Pyubx2, pyspartn, pyrtem nyílt forráskódú programok*, <https://github.com/semuconsulting> (Utolsó letöltés: 2025.08.29).