

TDK-dolgozat

Szerzők:

Pógár István

Máté Ákos

Debreceni Egyetem
Informatikai Kar
Informatikai Rendszerek és Hálózatok tanszék



Tudományos Diákköri Dolgozat

Téma: Időszinkronizáció általános célú GPS modulokkal

Szerzők:

Pógár István

Programtervező informatikus, MSc
II. évf.

Máté Ákos

Programtervező informatikus, MSc
II. évf.

Témavezető:

Dr. Orosz Péter

egyetemi adjunktus

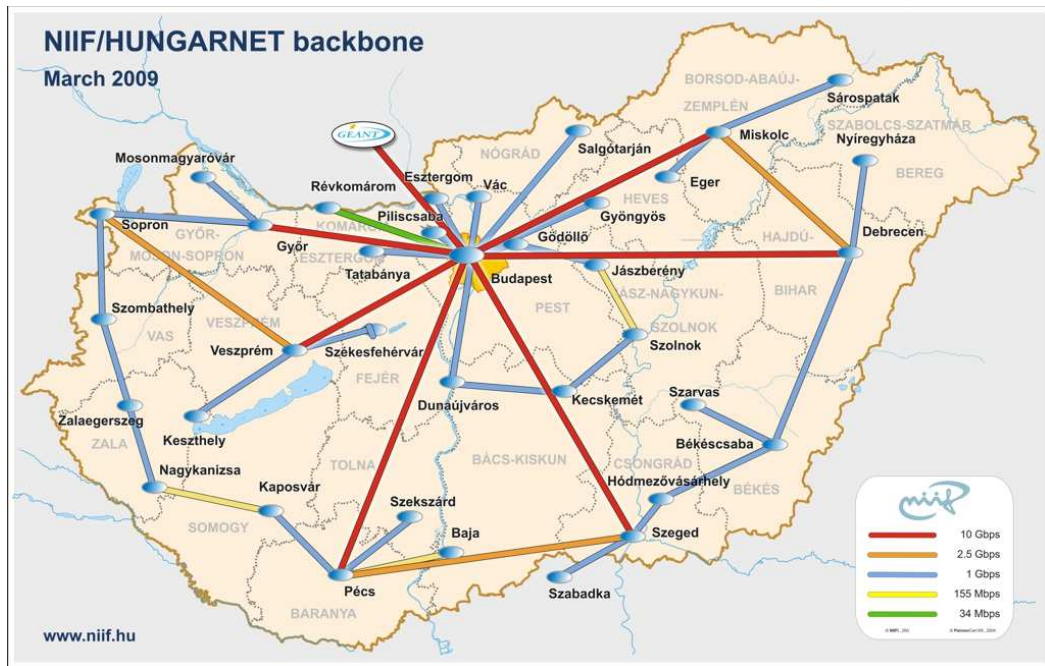
Debrecen, 2012.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	4
1.1 Célkitűzés	5
1.2 State of the art.....	5
2. Elméleti alapok	7
2.1 Globális helymeghatározó rendszer.....	7
2.2 Az NMEA protokoll	8
2.3 Az R programozási nyelv	9
2.4 Felhasznált matematikai háttér	9
3. A mérőrendszer.....	10
4. A naplózó program szerkezete	14
4.1 A statisztikai gyűjtő rendszer működése	17
5. Mérési körülmények	18
5. Adatok feldolgozása	19
5.1 Hőmérsékletnaplózó eszköz	27
5.2 Konklúzió	31
6. Összefoglalás	32
7. További tervek.....	33
8. Ábrajegyzék.....	34
9. Irodalomjegyzék	36
10. Saját munka leírása.....	38
11. Köszönetnyilvánítás	38

1. Bevezetés

Napjainkban a rohamosan növekvő adatforgalom a hálózat sávszélességének növekedését követeli. Míg a korábbi időkben a 10 és 100 Mbit/s-os hálózatok voltak elterjedőben, addig manapság ezt 1 és 10 Gbit/s-os hálózatokra bővítették (1. ábra). Néhány éven belül pedig át kell térni a 40 és 100 Gbit/s-os gerinchálózatokra is. Ilyen sebességek mellett az adatforgalom ellenőrzése nagyfokú pontosságot követel.



1. ábra - Gerinchálózati topológia (Forrás: <http://www.niif.hu>)

A hálózati forgalom mérés során, a kommunikáció utólagos elemzéséhez, a hálózat monitorozó eszközök (melyek akár különböző országokban is elhelyezkedhetnek) minden csomagra időbélyeget helyeznek el. Ezen időbélyegek által valósítható meg elosztott rendszereknél a mérési eredmények sorrendhelyes központi tárolása, továbbá következtetni lehet arra, hogy az elkapott csomagok milyen késleltetéssel haladtak végig az adott hálózaton. Ebből kifolyólag az időbélyegzésnél használt lokális rendszeridő szerves része a vizsgálatnak. Elosztott rendszereknél elengedhetetlen követelmény, hogy a monitorozó eszközöknek – függetlenül fizikai helyüktől – szinkronizálva legyen az órájuk. Kisebb sávszélességű hálózatokban, erre a problémára többféle megoldás is létezik, például az NTP [1] vagy a PTP [2]. Az NTP egy hálózati protokoll, mellyel egy központi szervertől kérhetjük le a pontos időt, viszont az üzenetváltás időtartamát sok tényező befolyásolja, illetve a változó hálózati

késleltetés miatt a pontos időtől való eltérés ingadozik. A PTP csak speciális körülmények között képes adott időtartamot garantálni.

1.1 Célkitűzés

Kihasználva azt a lehetőséget, hogy a globális pozicionáló rendszerek (GPS [3]) az egyezményes időt (UTC [4]) is sugározzák, dolgozatunkban annak járunk utána, hogy lehetséges-e általános célú GPS vevőkkel elérni azt az időbeni pontosságot, amely a 40 és 100 Gbit/s sávszélességű hálózatok forgalmának monitorozásához szükséges. Cél az, hogy a szinkronizált hálózat monitorozó eszközök belső órái között ne legyen 50 ns-nál nagyobb eltérés. Erre azért van szükség, mert elosztott rendszerekben, szélsőséges esetben, ha a két vagy több monitoring rendszer azonos hálózaton belül van, akkor mikroszekundumos tartományba esik a csomag által megtett út. Ilyen sebesség monitorozására pedig legalább 50 ns pontosságú időre van szükségünk ahhoz, hogy a monitoring rendszerben tárolt csomagok kronológiai sorrendje a központi adatbázisban a valóságnak megfelelő legyen.

Dolgozatunkban bemutatjuk a kutatásunk során általunk megépített mérőrendszert, hőmérőrendszert, és ezek komponenseit felhasználva elvégezzük a GPS rendszer hatékonyságelemzését, ezért nagy hangsúlyt fektetünk az adatok feldolgozására, melyek alapján levonjuk majd végső következtetéseinket.

1.2 State of the art

Nagysebességű hálózat-monitorozó eszközök időszinkronizációjával már többen is foglalkoztak [5][6], például Fendler Tamásnak sikerült kidolgoznia egy módszert, mely által egy hagyományos kvarc és egy GPS vevő kellő pontosságú időt képes biztosítani akár 10 Gbit/s sebességű hálózat monitorozásához. GPS rendszerek pontosságának vizsgálatáról is születtek tanulmányok, melyek során például különböző GPS vevők pontosságát hasonlították össze eltérő körülmények között [7]. Viszont abban a témában, hogy miként lehet ultra nagysebességű hálózat-monitorozó eszközök óráit szinkronizálni általános célú GPS vevőkkel, jellemzően nem születtek tudományos publikációk, eredmények, így ez szemlélteti azt, hogy mi teszi ezt a kutatást izgalmassá. Természetesen el lehet indulni szoftveres, gépeket összekötő hálózat alapú időszinkronizáció alapján (NTP), de lévén, hogy az eljárás szoftveres alapú, nem tudja teljesíteni az elvárt követelményeket, túl nagy késleltetések keletkeznek, gondoljunk csak akár az operációs rendszer ütemezésére. Viszont GPS alapú időszinkronizációval foglalkoztak már, sőt, kész termékek is kaphatók arra a célra, hogy a monitorozó eszközök óráit szinkronban tartsuk GPS műholdak segítségével [8], de ezek több

nagyságrenddel többbe kerülnek, mint az általános célú vevők. Továbbá megtehetnénk azt is, hogy kész atomórákat telepítünk egy-egy szerver idősinkronizáló modulba, melyek igen csekély helyet foglalnak el, viszont ezek ára is igen borsos, ráadásul az ilyen kisméretű atomórák pontossága egy nagyságrenddel kisebb, mint a GPS műholdak atomórái esetében. Ezért kezdtük vizsgálni azt, hogy az általános célú vevők milyen feltételek mellett alkalmasak a fent bemutatott a feladatra.

2. Elméleti alapok

Ahogy a bevezetésben is tárgyaltuk, két egység idősinkronizációjára többféle megoldás is létezik, hogy melyiket használjuk, az nagyban függ attól, hogy az adott módszer milyen időpontosságot tud garantálni. Az a technológia, amelyik a legnagyobb lefedettséggel rendelkezik, a GPS.

2.1 Globális helymeghatározó rendszer

A GPS globális helymeghatározó rendszer, melyet az Amerikai Egyesült Államok Védelmi Minisztériuma fejlesztett ki és üzemeltet. Lényege, hogy a Föld körül keringő műholdak és egy GPS vevő készülék segítségével a felhasználók olyan információkra tehetnek szert, mint: globális koordináták, UTC idő, tengerszint feletti magasság, látott és felhasznált műholdak száma, stb. A műholdak két frekvencián sugároznak: 1575,42 MHz és 1227,6 MHz. Az utóbbi katonai célokat szolgál, az ezen a frekvencián érkező adatokat a civil eszközök nem tudják értelmezni. A civil frekvencián történő pozíció-meghatározás pontossága körül-belül 10 méter, míg a katonai frekvenciáé néhány centiméter.

A GPS rendszert elsősorban navigációs feladatokra tervezték, de tökéletesen megfelel idősinkronizációs feladatokhoz is, ugyanis minden egyes műholdon két rubídium [9] vagy cézium atomóra van elhelyezve, melyek a stabil frekvenciát szolgáltatják. A műholdak óráit az egyezményes koordinált világidővel (UTC) szinkronizálják, illetve, mivel ezek az atomórák pontosak, de nem tökéletesek, ezt is korrigálják földi állomásokról.

A helymeghatározás geometriai alapokra épül, ugyanis ha ismerjük a rádióhullámok terjedési sebességét továbbá a hullámok kibocsátásának és beérkezésének idejét, akkor meg lehet határozni, hogy a forrás hol található. Mivel háromdimenziós pontokról van szó, így három ismert pont kell ahhoz, hogy meg tudjuk határozni, hogy a keresett pont fizikailag hol helyezkedik el. Mivel a pozícionáláshoz szükség van a pontos időre is, ezért elengedhetetlen egy negyedik műhold használata. Egyes geodéziai műszerek legalább 5 műhold folyamatos vételét igénylik, viszont a műholdak mozgására olyan tényezők is kihatással vannak, mint a Föld, illetve más égitestek mágneses ereje, napkitörések, stb. Ezeket bonyolult számítások alapján szintén korrigálják.

Mivel a civil rendszer pontossága viszonylag kicsi (kb. 10 méter), így segédműhold-rendszereket használnak (SBAS (műhold alapú korrekciós rendszerek)[10] (EGNOS[11], WAAS[12])), amelyek ezen a pontosságon növelnek. Azonban a pontatlanságok legnagyobb forrása abból az útból ered, amit a rádióhullámok megtesznek, hiszen a hullámoknak át kell

jutniuk a légköri rétegeken, ahol a rádióhullámok ugyanúgy megtörnek, mint a fény más közegben (gondoljunk csak a vízre), mivel a légkör összetétele és hőmérséklete rétegenként változik. Azonban az ehhez tartozó korrekciós adatokat is sugározzák. A korrekció lényege, hogy viszonylag nagy gyakorisággal rögzítik a Földet körülvevő légkör összetételét egységekre lebontva. Ezeket az információkat segéd műholdak sugározzák. Minden korrekciós megoldást egybevéve, jó égboltozatra való rálátási körülmények mellett elérhető a 2-3 méteres pontosság.

A műholdak és a vevő közti kommunikáció során a műholdak többek között a saját pozíciójukat, azonosítójukat és a pontos időt sugározzák. A GPS vevő ezekből az adatokból számolja ki a saját pozícióját és különböző jósági tényezőkkel jellemzi azt. Ilyen jellemzők a DOP (Delution of Precision) [13] értékek, amelyek azt mondják meg, hogy a GPS műholdak geometriai elhelyezkedése milyen hatással van a pozíció pontosságára. Az 1. táblázat nyújt magyarázatot ezen értékekhez.

DOP érték	Értékelés
<1	Ideális
1 – 2	Kitűnő
2 – 5	Jó
5 – 10	Elfogadható
10 – 20	Gyenge
> 20	Nagyon gyenge

1. táblázat – A DOP értékek értékelése

A kiszámolt adatokat a GPS vevők általában NMEA [14] vagy SiRF [15] protokollal küldik tovább soros interfészen keresztül.

2.2 Az NMEA protokoll

A GPS modul soros vonalon keresztül NMEA protokollal kommunikál. Minden egyes NMEA mondat valamilyen információ típusra vonatkozik. Az egyes mondatok \$ jellel kezdődnek és * illetve ellenőrző összeggel végződnek. A köztük található adatok vesszővel vannak elválasztva.

A 2. ábra szemlélteti, hogy egy GPS vevőtől milyen NMEA csomag érkezik egy másodperc leforgása alatt. Azt az információt, amelyet két vessző közti érték rejt, az NMEA saját specifikációjából tudhatjuk meg. Például a \$GPGGA mondat elején szereplő számsor az

első vesszőig az UTC időt jelzi: 9 óra, 56 perc, 43 másodperc, a következő számsor a szélességet jelzi, majd hosszúságot, jelen pillanatban van-e pozíció, hány műholdat használ, stb. A fejlesztés során ezekre az adatokra alapoztuk a statisztikáinkat.

```
$GPGGA,095643.000,4732.5750,N,02138.4002,E,2,09,0.9,121.8,M,40.1,M,6.8,0000*76
$GPGSA,A,3,31,25,02,29,12,14,04,09,27,,,,1.5,0.9,1.2*3E
$GPGSV,3,1,11,25,74,315,39,12,59,091,40,29,56,237,38,02,44,076,41*72
$GPGSV,3,2,11,31,28,313,39,14,18,253,30,04,14,040,30,09,11,160,28*72
$GPGSV,3,3,11,27,05,159,22,10,05,066,,37,35,180,32*4A
$GPRMC,095643.000,A,4732.5750,N,02138.4002,E,0.00,,110912,,,D*79
$GPVTG,,T,,M,0.00,N,0.0,K,D*16
```

2. ábra - 1 másodpercre vonatkozó NMEA mondat

2.3 Az R programozási nyelv

Statisztikai elemzéseinkhez az R programozási nyelvet használtuk fel [16]. Az R számtalan statisztikai módszert tartalmazó nyílt forrású statisztikai és grafikus környezet, mely egyben programozási nyelv is. Egyik előnye, hogy használatához nem szükséges mély programozási ismeretekkel rendelkezni, mely által különböző területeken dolgozó emberek is képesek elsajátítani használatát.

2.4 Felhasznált matematikai háttér

Mérési eredményeink feldolgozásakor, ahhoz, hogy átláthatóbb és következetesebb grafikonokat tudjunk készíteni következtetéseink levonása érdekében, mozgó átlagot és szórást számítottunk, valamint hisztogram alapú megjelenítést használtunk. Mozgó átlag számításakor (1) egy adott k intervallumra számítottuk ki az átlagot, melyet folyamatosan mozgattunk az egész adattartományon. Tapasztalati úton meghatároztuk azt is, hogy ezt az intervallumot milyennek kell választani.

$$y_i = \frac{1}{k} \sum_{j=i}^{i+k-1} SNR_j \quad (1)$$

Mozgó szórás számítására a (2) formulát használtuk, ahol a var szórás-meghatározó függvény R-ben, jelen esetben ennek paramétere pedig egy oszlop, melyen az elejétől a végéig végighaladunk, a szórást pedig mindig az $[i, i+k-1]$ intervallumból számoljuk.

$$y_i = \sqrt{var(period_{j \in [i, i+k-1]})} \quad (2)$$

Hisztogramot használtunk ahhoz, hogy meghatározzuk, hogy egy adott érték hányszor fordul elő egy adathalmazban. Ezeket a számítási formulákat több tényezőre is alkalmaztuk az R programozási nyelv segítségével.

3. A mérőrendszer

Méréseink alapjául három Fastrax IT321 típusú GPS vevőt választottunk [17]. Korábbi kutatásunk folyamán dolgoztunk már ezzel a modullal, mely során hasznos tapasztalatokat szereztünk [18]. Ezekhez a modulokhoz panelt terveztünk és készítettünk (3. ábra).



3. ábra - FASTRAX IT321 és a nyomtatott áramkör

Minden ilyen nyomtatott áramköri lapnak 7 ki- bemeneti lába van:

- *Antenna csatlakozó* – ehhez csatlakoztatható passzív és aktív antenna egyaránt. Méréseink során kültéren is használható aktív antennákat használtunk, melyek előnye a passzívakkal szemben, hogy nagyobb az érzékenységük és jó vételt biztosítanak akkor is, mikor a passzív antennák erre már nem képesek.
- *VDD* – tápfeszültség pozitív pólusa
- *GND* – tápfeszültség negatív pólusa
- *ON/OFF* – a készenléti állapot be- és kikapcsolására szolgáló vezeték
- *TX* – aszinkron soros vonal adatok küldésére
- *RX* – aszinkron soros vonal adatok fogadására
- *PPS* – dedikált vezeték másodperc jelzésére

A GPS modul minden másodperc kezdetekor egy 1 μ s-os impulzust ad ki a PPS (Pulse Per Second) vezetéken. Ez a másodperc az UTC idővel szinkronizálva van. A vevő bekapcsolása után, addig, amíg nincs fix vétel, a PPS kimeneten nem jelenik meg semmilyen jel. Miután a pozícióját meg tudta határozni a vevő, rendszeresen küldi a PPS kivezetésen a másodpercek kezdetét jelező impulzust. Ha a vétel megszűnik, a PPS jelek küldését a vevő a saját hőmérséklet-kompenzált kristály oszcillátora alapján folytatja. Ha sokáig nincs rálátás a műholdakra, az idő múlásával a két modul által kiadott PPS jelek elcsúszhatnak egymástól, mivel ezek az órajel források nem drága atomórák, melyek pontossága 10^{-14} nagyságrendű (vagyis egy időegység alatt $1/10^{14}$ időegységet tér el a pontos időtől), hanem egyszerűbb

kvarc oszcillátorok, melyek bár hőmérsékletváltozásukat korrigálják, bizonyos idő eltelte után a pontos időhöz képest elcsúsznak.

Kezdeti feladatunk az volt, hogy megmérjük, hogy a három GPS modultól érkező PPS jelek között mennyi az eltérés. Mivel a korábban említett 50 ns-hoz akartunk viszonyítani, így hozzávetőlegesen 2–5 ns-os felbontásra volt szükségünk. Az időméréshez egy Atlys FPGA [19] kártyát (4. ábra) választottunk, mivel ez volt a várhatóan legnagyobb frekvencián működtethető fejlesztőkártya, ami a rendelkezésünkre állt.



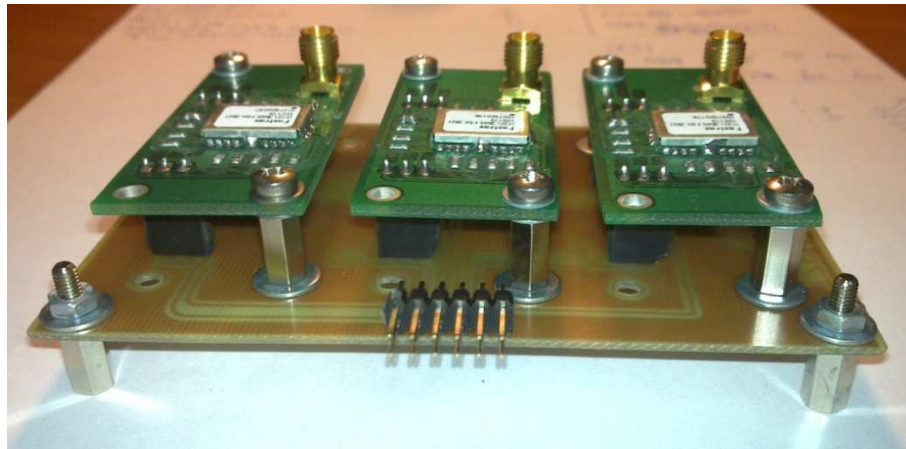
4. ábra – Spartan 6-os FPGA Atlys fejlesztőpanelen

(Forrás: www.digilentinc.com)

Azért választottunk FPGA (Field Programmable Gate Array) alapú feldolgozó egységet, mert arra volt szükségünk, hogy a PPS jeleket párhuzamosan vizsgáljuk. Erre a feladatra a legcélszerűbb pedig egy ilyen programozható logikai tömb, amely többek között párhuzamos programfuttatásra lett kifejlesztve. A Spartan 6 típusú FPGA órajelet 300 MHz-re állítottuk be, így 3,3 ns-os felbontással tudtunk számolni. Ezt úgy értük el, hogy az FPGA-ban lévő PLL-el (Phase Lock Loop) felszoroztuk a 100 MHz-es órajelet 6-al, majd leosztottuk 2-vel. Ezt a műveletet a Xilinx ISE (fejlesztői környezet) végezte el. Azért nem választottunk magasabb órajelet, mert 300 MHz felett nem teljesültek az időzítési megszorítások.

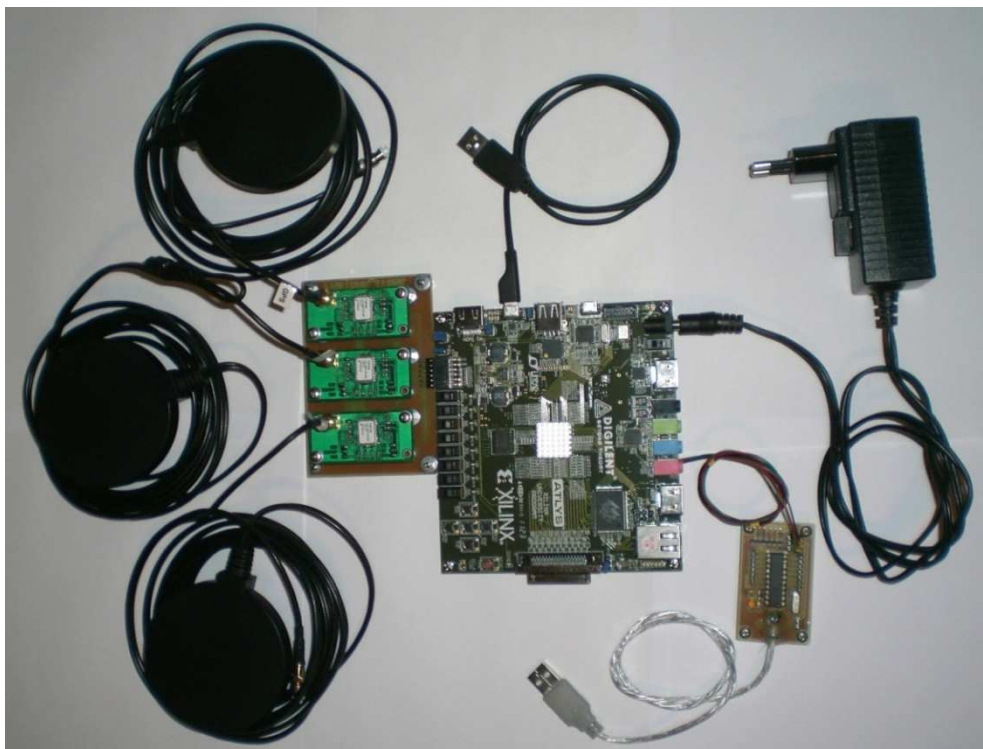
A három vevőt az FPGA-hoz az Atlys panel Pmod csatlakozóján keresztül csatlakoztattuk. Annak érdekében, hogy a mechanikai érintkezések biztosak legyenek,

nyomtatott áramköri panelt terveztünk és építettünk (5. ábra). A panelekre a külső aktív antennákat SMA csatlakozón keresztül kötöttük be.



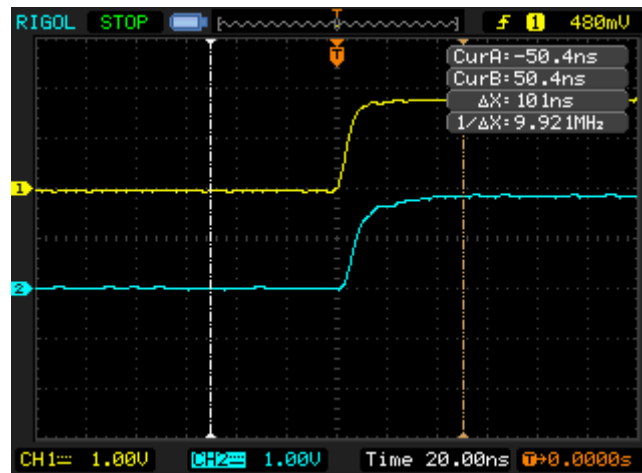
5. ábra - A három GPS vevő egy nyomtatott panelre rögzítve

Az FPGA az összegyűjtött adatokat soros vonalon keresztül továbbítja. Mivel számítógépeinken nincs soros interfész csatlakozó, ezért felhasználtuk az Atlys fejlesztőkártyán lévő soros-USB interfész átalakítót (XR21V140IL16 típusú integrált áramkör), aminek következtében USB-n keresztül köthettük össze a mérőrendszert a számítógéppel. A teljes mérőeszközzel készült képet a 6. ábra szemlélteti.



6. ábra – A teljes mérőrendszer

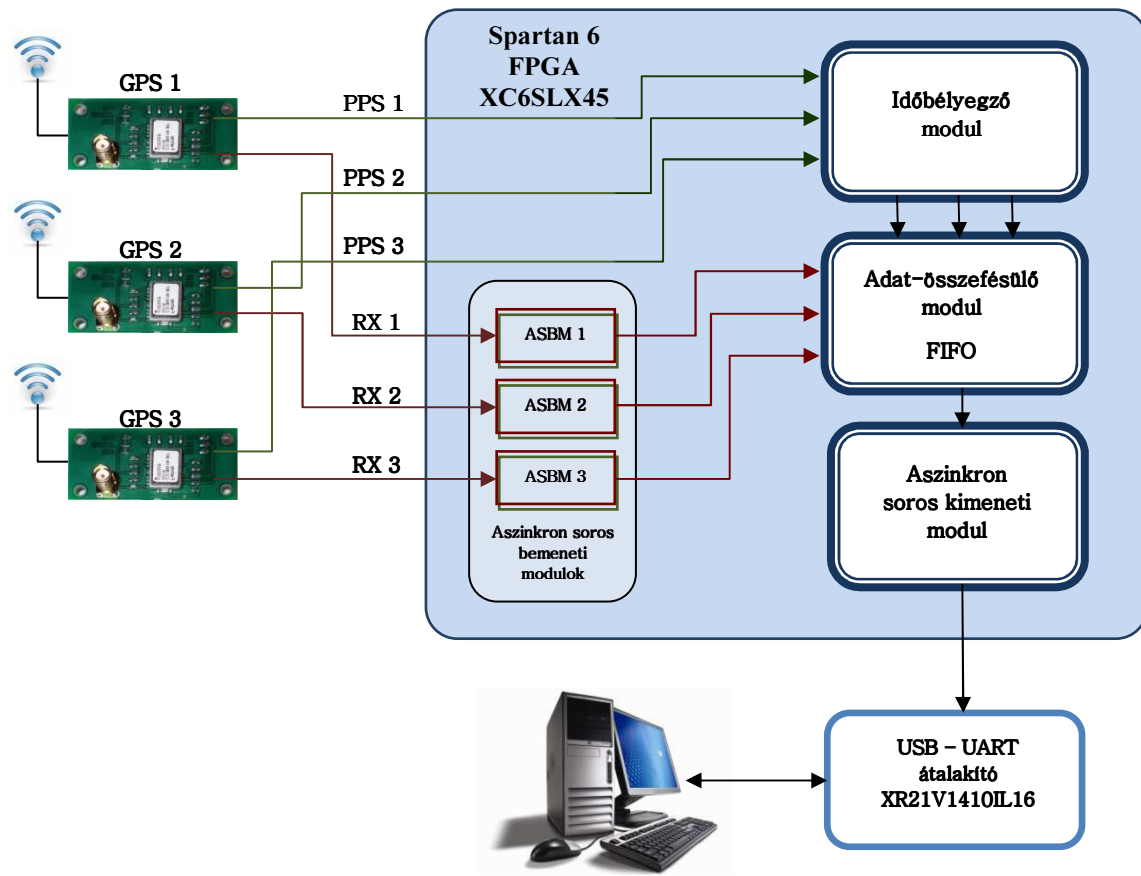
Mivel 50 ns alatti időintervallumokat vizsgáltunk, így nem maradhatott ki a PPS jelek felfutási időinek vizsgálata sem. Az erre vonatkozó mérést a 7. ábra mutatja be, ahol két különálló GPS vevő PPS jele látható, melyek felfutási ideje ~5 ns (ez megerősítette a modul adatlapjában szereplő adatot). A mérést mind a három modulon elvégeztük és elmondhatjuk, hogy a felfutás minden vevőnél azonos és a bemenet (Atlys FPGA board) komparálási szintjét ugyanott keresztezi, melyet egy későbbi mérés folyamán igazoltuk (lásd 23. oldal).



7. ábra – A PPS jel felfutási ideje

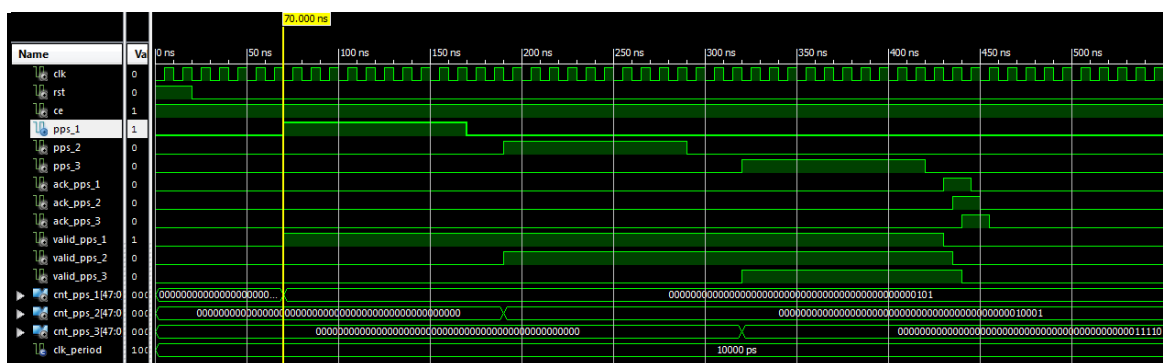
4. A naplózó program szerkezete

Az FPGA-n belül helyet kapott konfiguráció szerkezeti felépítését a 8. ábra szemlélteti.



8. ábra – A mérőrendszer elvi felépítése

A GPS modulok aszinkron soros kimeneteiről érkező jelek az FPGA-ban egy-egy aszinkron soros fogadó egység bemenetére érkeznek, amely a soros adatokat párhuzamossá alakítja. A PPS kimenetek pedig egy időbélyegző modulra csatlakoznak, amely minden bejövő impulzus hatására megjegyzi a belső számlálójának az értékét, és a megfelelő kimenetén ezt elérhetővé teszi.

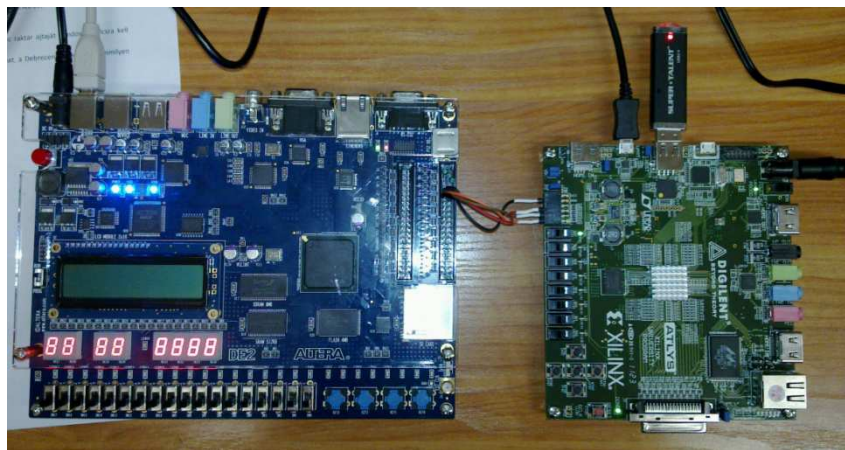


9. ábra – A PPS jelek időbélyegzésének szimulációja

A 9. ábra szemlélteti ennek a modulnak a szimulációját. Amint érkezik egy felfutó él a PPS bemenetre, a számláló aktuális értéke rögtön megjelenik a kimeneten és egy jelző bit (*valid_pps*) is átvált 1-es szintre, jelezve, hogy érvényes adat érhető el. Ha a feldolgozó modul kiolvasta ezt az értéket, akkor a nyugtázó (*ack_pps*) vezetéken jelez egy rövid impulzussal. Ekkor az érvényesség jelzése is megszűnik.

Az időbélyegző modulból és a soros fogadó egységektől érkező adatokat a legfelső modul adat-összefésülő egysége felcímkézve behelyezi egy olyan kimeneti adattárolóba, amely az adatokat beérkezési sorrendben teszi elérhetővé a kimeneten, vagyis egy FIFO-ba (First In First Out). A címke jelen esetben egy, az adatot megelőző bájt, amely arról hordoz információt, hogy a következő adat milyen típusú és honnan jött. Az adat-összefésülés és FIFO-ban tárolás elegendően gyors ahhoz, hogy akkor se történhessen adatvesztés, ha mind a hat forrásból egyszerre érkezik adat. A FIFO kimenete az aszinkron soros adó modulhoz csatlakozik, amely ha nem üres a FIFO, folyamatosan olvassa ki az adatokat, és küldi tovább az USB-UART átalakító chipnek, amely aztán a PC felé továbbítja mindent.

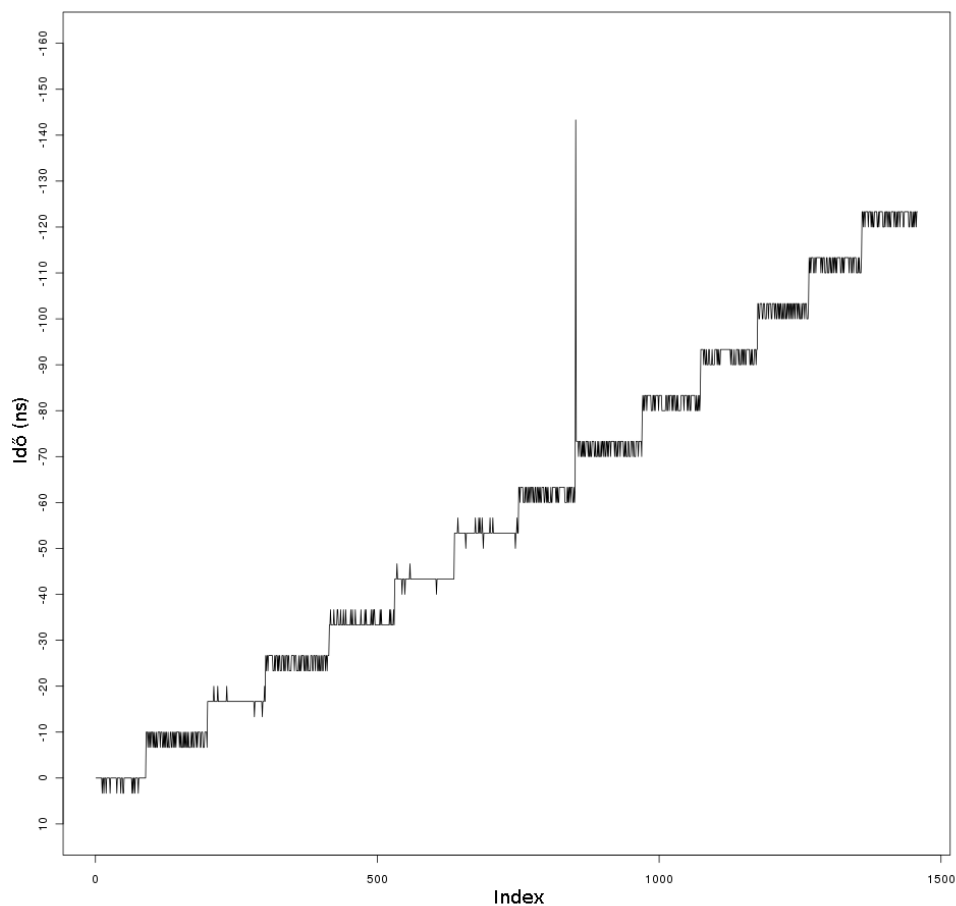
Annak érdekében, hogy meggyőződjünk a PPS időbélyegző modulunk működésének helyességéről, egy másik, Altera DE2 [20] típusú FPGA fejlesztőpanelen egymáshoz képest elcsúsztatott PPS jeleket generáltunk, amit az Atlys kártyára vezettünk be (10. ábra).



10. ábra – PPS jelek generálása tesztelés céljából Altera DE2-es panelen

A kapott eredményt a 11. ábra szemlélteti, ahol az x tengely a PPS jelek sorszámát jelöli, az y tengely pedig az 1-es és 2-es bemenet között mért elcsúszást. Az elcsúszás mértékét a DE2-es fejlesztőkártya kapcsolóival állítottuk be, a magas tűsike ennek az eredménye (a magasabb helyiértékű bit kapcsolóját hamarabb sikerült átkapcsolni, mint az alacsonyabb helyiértékűt). Az elemzés során legfeljebb két órajelnyi eltérést tapasztaltunk a

generált és a mért PPS jelek között, amely még a tűréshatáron belül volt, így elmondhatjuk, hogy a mérőmodulunk megfelelően működik.



11. ábra – A generált PPS-jelek fogadásának ábrázolása

4.1 A statisztikai gyűjtő rendszer működése

A PC oldalon tulajdonképpen tetszőleges soros-port naplózó program megfeleltethető volna az adatok mentéséhez, de mi egy saját, C programozási nyelven írt programot használtunk erre a célra, amely a nyers adatfolyam mentésén kívül szétválogatott formában is tárolja a beérkező adatokat. Ez azért előnyös, mert így már az adatgyűjtés közben is észlelhetők az esetleges hibák. Például, ha érintkezési hiba lép fel az egyik GPS modul PPS kivezetésénél, akkor ezt észrevehetjük az időbélyegekhez tartozó leválogatott fájlok méretének eltéréséből, ilyenkor ugyanis nincs PPS impulzus, minek hatására nincs időbélyeg az aktuális másodperchez, így nem növekszik a fájl mérete sem.

Az összegyűjtött adatokat elemzés előtt a feldolgozáshoz használt szoftvernek megfelelő formátumúra kell alakítani. Nagyon sok program által támogatott és egyszerű formátum a CSV (vesszőkkel elválasztott értékek), ezért az általunk készített program is ezt használja kimeneti formátumként. A program feladata, hogy a nyers adatokból szétválogassa az egyes GPS vevőktől érkezőeket, dekódolja az NMEA mondatokat, párosítsa az ugyan ahhoz a másodperchez tartozó információkat és ezekből a számunkra szükségeseket írja a kimenet egy sorába.

Az összegyűjtött adatok ábrázolását és elemzését az R környezetben végeztük. Számunkra a legfontosabb vizsgálandó értékek a különböző modulok PPS kimenetéről származó impulzusok beérkezési idői közötti eltérés, ezen időeltérések szórása valamint az egymást követő impulzusok között eltelt idő szórása. Ezeket az értékeket próbáltuk összefüggésbe hozni a modulok által küldött egyéb minőségi mutatókkal, mint például jel/zaj arány, a használatban lévő műholdak száma, HDOP, VDOP, PDOP.

5. Mérési körülmények

Méréseink során vizsgálni szeretnénk volna azt, hogy a környezeti körülmények miként vannak kihatással a mérési eredményekre. Kezdetben csak néhány órás tesztet végeztünk nyílt terepen, ahol teljes rálátást kaptunk az égboltozatra. Ezzel a méréssel bizonyosodtunk meg arról, hogy a mérőberendezés jól működik illetve megvizsgáltuk azt is, hogy a GPS vevők hány műholdat észlelnek adott körülmények között. A mérés folyamán az égbolt enyhén felhős volt. A három antennát, melyek egyenként 3 méteres kábelhosszal rendelkeznek, egymástól egyenlő távolságra helyeztük el, 120° -os szöget bezárva egymással.

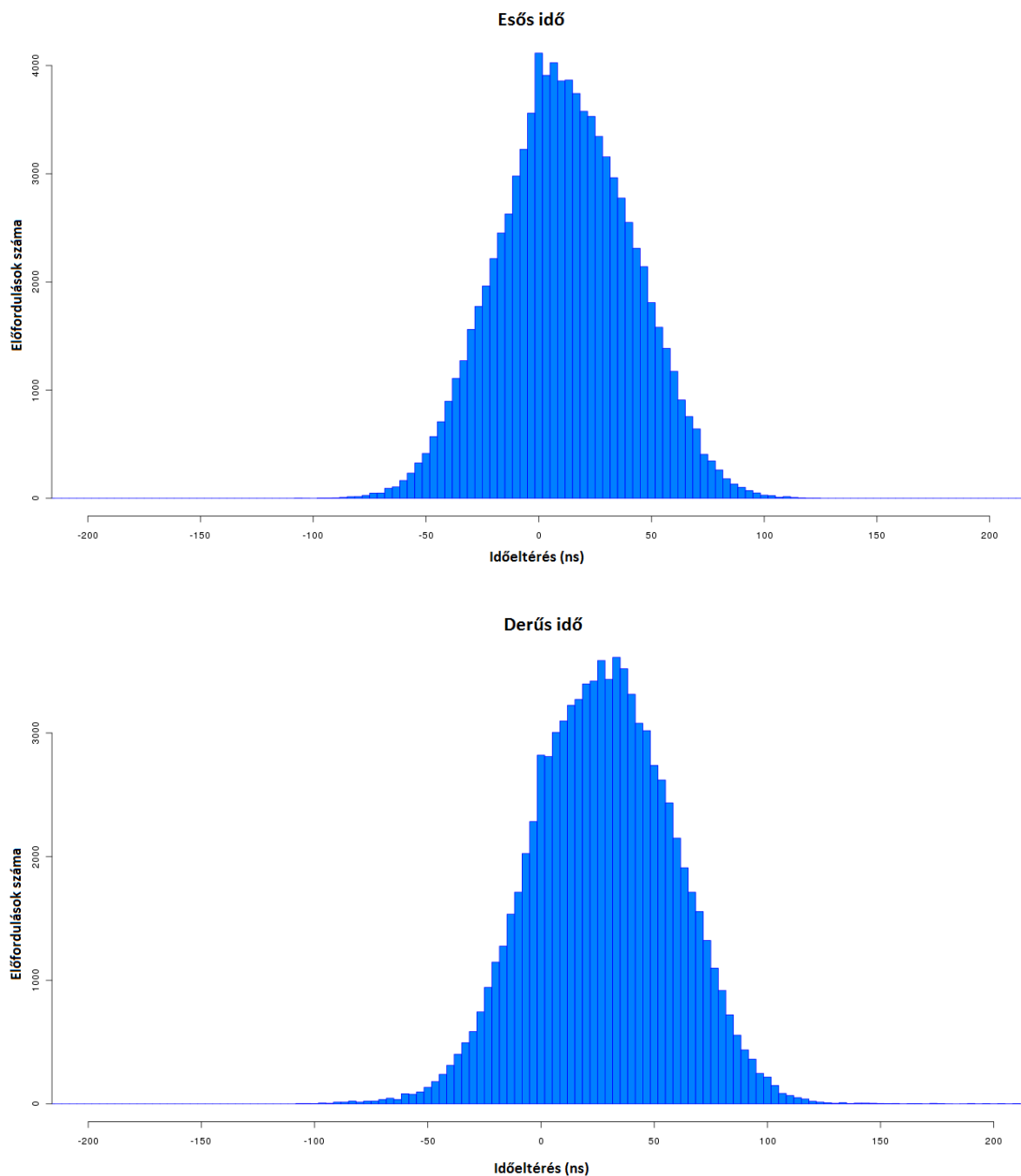
A következő mérések hosszát legalább 24 órára terveztük, így olyan helyszínt kellett választanunk, ahol a mérőeszközt éjszakára is kint lehetett hagyni, ez pedig a Debreceni Egyetem Informatika Kar épületének teteje volt, ahol hálózati tápellátás és jó égboltozatra való rálátás is a rendelkezésünkre állt. A laptopot, az Atlys fejlesztőpanelt és a tápegységeket egy fedeles, zárható dobozba tettük. Többféle antenna elrendezéssel is folytattunk méréseket (12. ábra), illetve változó időjárási körülmények között is (napsütés, felhős ég, eső, hidegebb és melegebb nappali hőmérséklet). Az így begyűjtött adatokon hajtottuk végre elemzéseinket.



12. ábra – Kétféle mérési módszer az Informatika Kar tetején:
a) az antennák távol vannak egymástól;
b) az antennák szorosan egymás mellett vannak

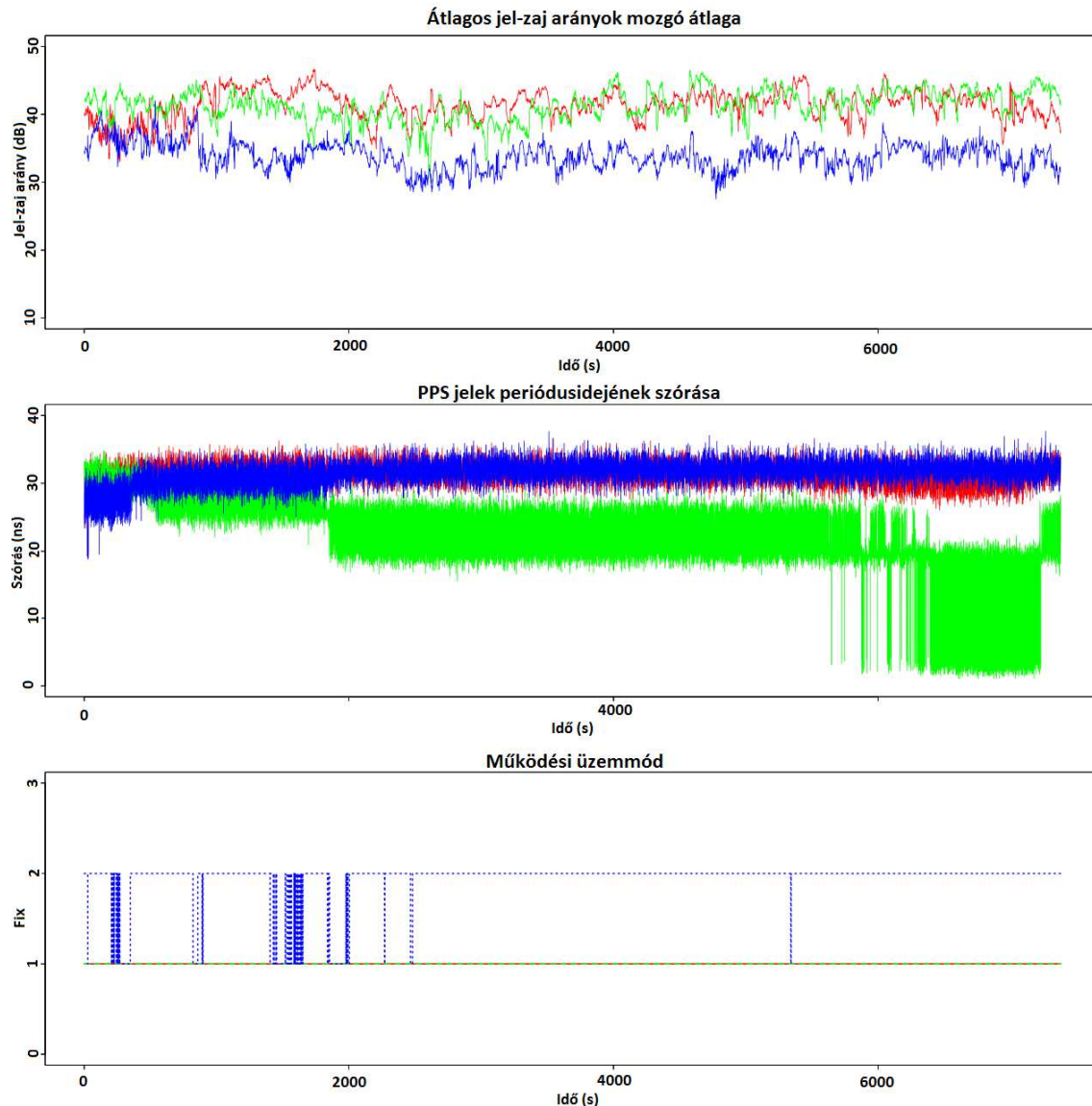
5. Adatok feldolgozása

A mért adatok alapján legelőször kiszámítottuk és ábráztuk, hogy két PPS jel között milyen időeltérés tapasztalható. Ezt a 13. ábra mutatja be kétféle antenna elrendezésben és időjárási körülménnyel hisztogram formájában. Mind a két mérés 24 órán át tartott.



13. ábra – PPS idők közti különbségek hisztogramja különböző körülmények között

Mind a két hisztogramon ugyanannak a két vevőnek a PPS impulzusai közötti időeltérések előfordulásai láthatóak. A hisztogramokon látható, hogy a megfigyelések túlnyomó többsége a ± 100 ns tartományba esik.



14. ábra - 10 másodperces mozgó átlag és szórás.

A következő vizsgálatban egyenként vizsgáltuk a GPS vevőkből érkező PPS jeleket azzal a céllal, hogy megállapítsuk, hogy mi befolyásolja a PPS jelek impulzusai között eltelt idő szórását, azaz a másodpercek hosszának szórását. A 14. ábra felső grafikonja az adott másodpercben pozicionáláshoz használt műholdak átlagos jel-zaj arányának mozgó átlagát ábrázolja. Megfigyeléseink alapján a két perces intervallumú mozgóátlag számítás bizonyult a legmegfelelőbbnek (ennek magyarázatát a 31. oldalon lévő leírás taglalja). A korábban említett NMEA csomagok tartalmazzák azokat az információkat is, melyek minden észlelt

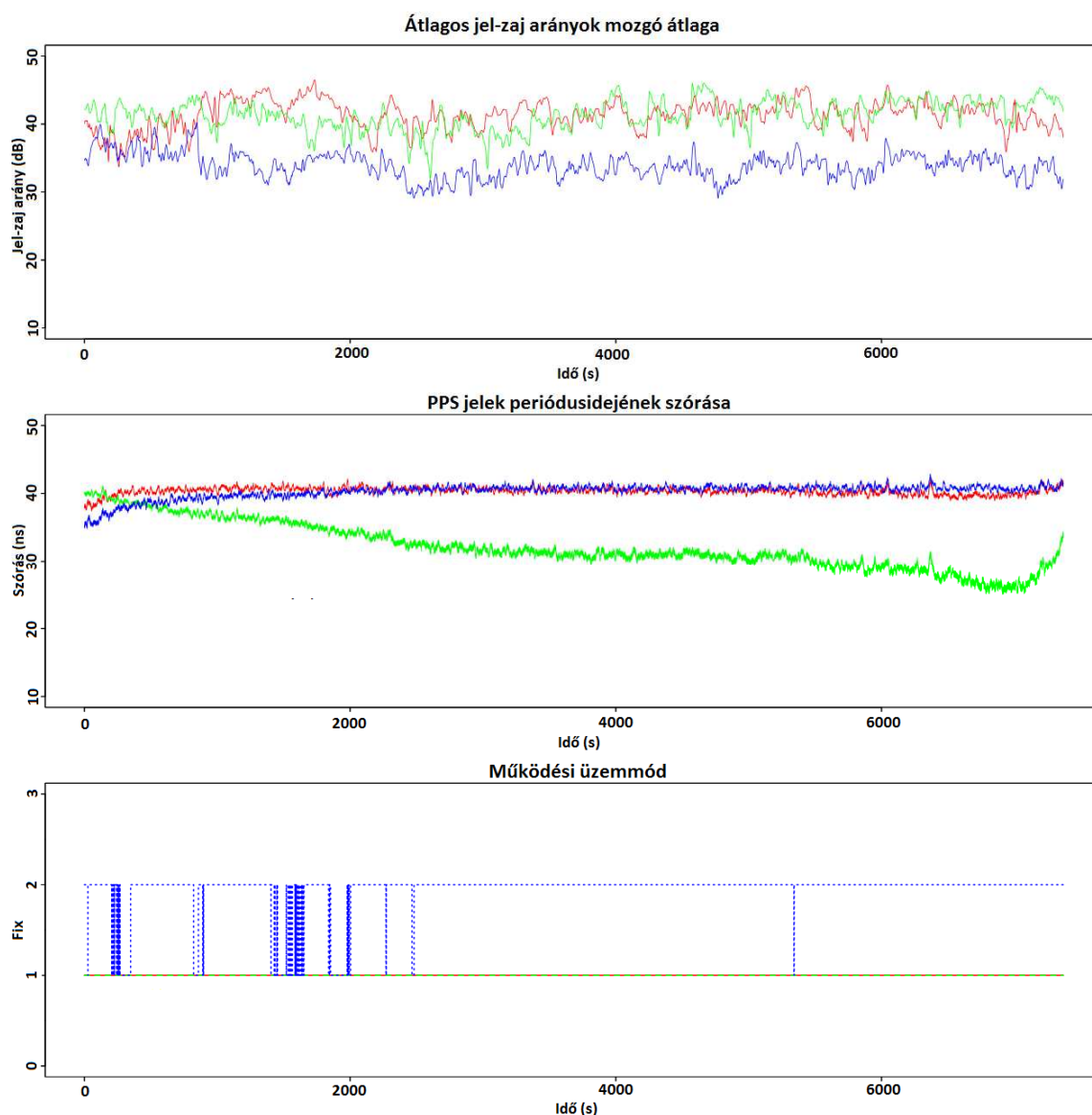
műholdra vonatkoznak. Így azt az információt is hordozzák, hogy az egyes műholdak jel-zaj aránya dB értékben mekkora mértékű.

A középső grafikonon látható a PPS jelek periódusidőinek szórása, amely minden pontban ugyan arra az időintervallumra volt kiszámítva, amire az előbbi mozgó átlag is. Az alsó grafikon pedig az aktuális működési üzemmódot jelöli, amely háromféle értéket vehet fel:

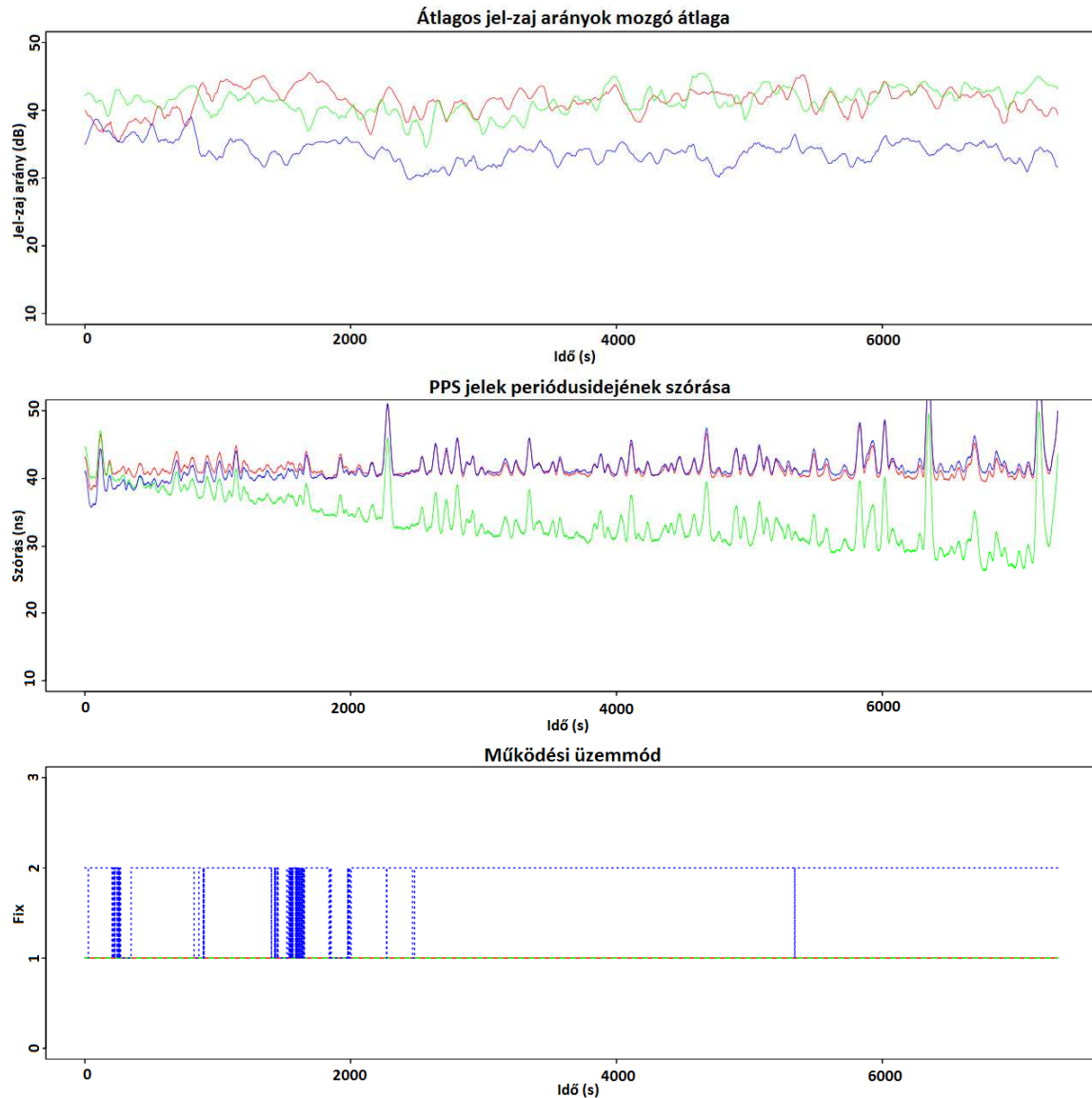
0 - nincs pozíció, a PPS jelet a saját szabadon futó lokális óra generálja;

1 - van pozíció, a PPS jel a GPS műholdak jeleivel szinkronizált;

2 - a GPS rendszer mellett SBAS rendszer által sugárzott korrekciós adatok is használatban vannak.

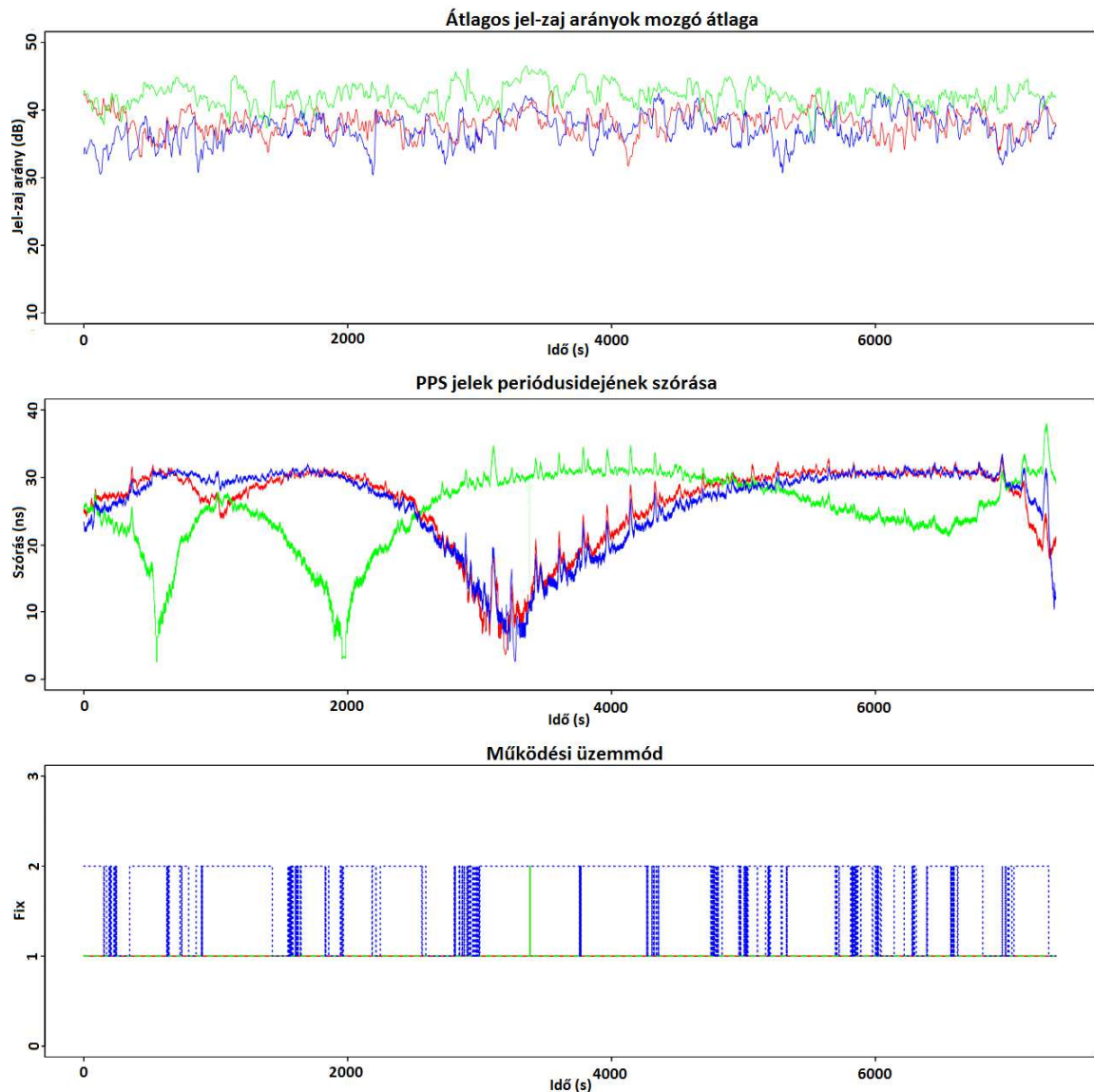


15. ábra - 2 perces mozgó átlag és szórás



16. ábra - 10 perces mozgó átlag és szórás

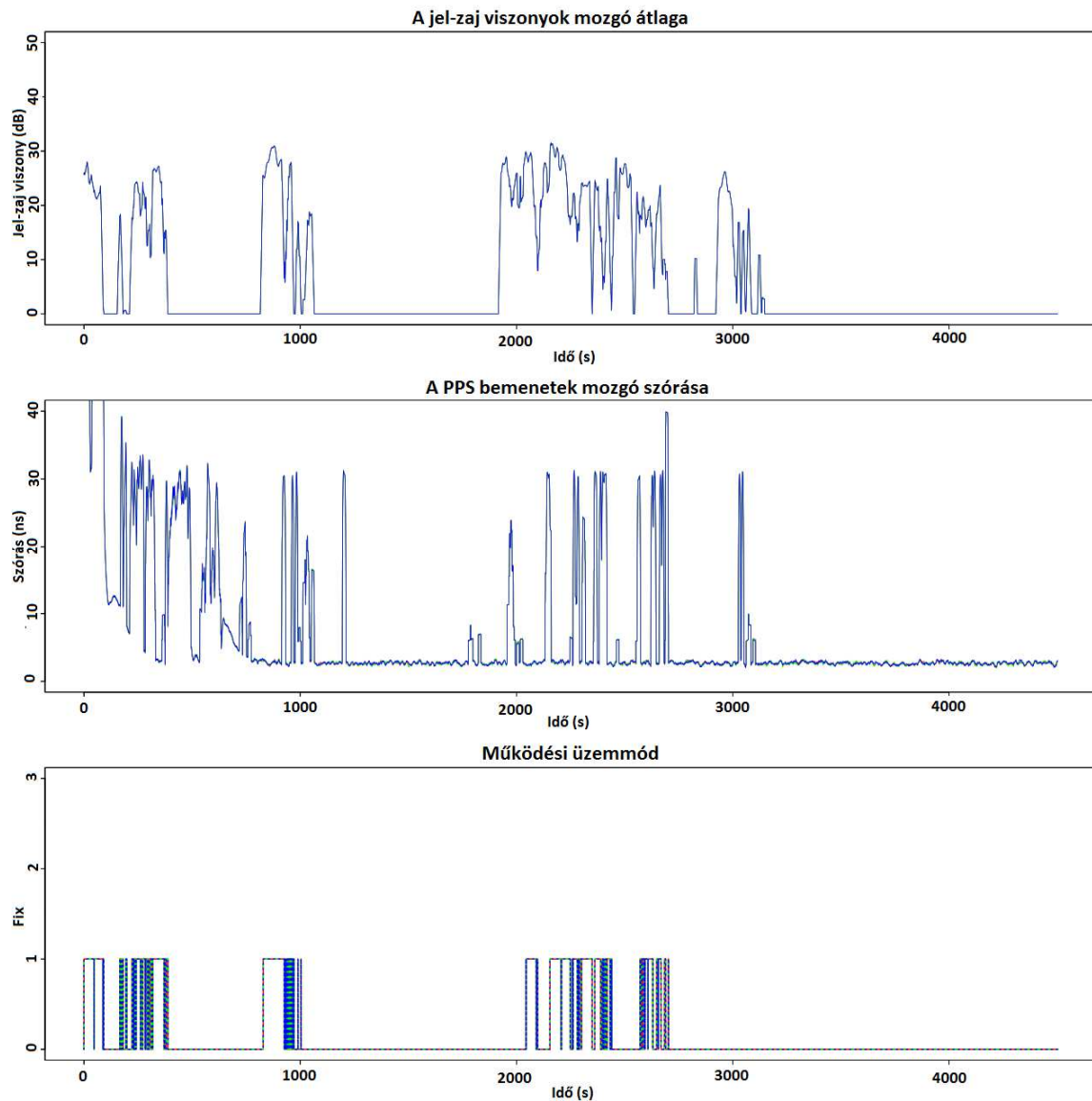
A 14., 15. és 16. ábrák ugyanazokból a mérési eredményekből származnak, a 10 perces intervallumokra számolt szórás esetén a mérő rendszer órajel-frekvenciájának lassú változása már jelentősen befolyásolja a kiszámított szórás értékét, ez abból állapítható meg, hogy azonos módon befolyásolja az eredményeket mind a három GPS vevő modul esetén. Egy másik napi mérés eredményét szemlélteti a 17. ábra.



17. ábra - Egy másik mérés 2 perces mozgó átlaga és szórása

Az ábrákon látszik, hogy a periódusidők szórása az adott körülmények között nem mutat jelentős összefüggést a jel-zaj aránnyal. A jel-zaj arány mellett vizsgáltuk a pozicionáláshoz használt műholdak számát, HDOP, VDOP, PDOP értékeket, de azokkal se sikerült jelentős összefüggést találni, viszont minden esetben úgy tűnt, hogy a PPS periódusidők szórásának felső korlátja nagyjából 30 ns a grafikonok megfigyeléséből adódóan.

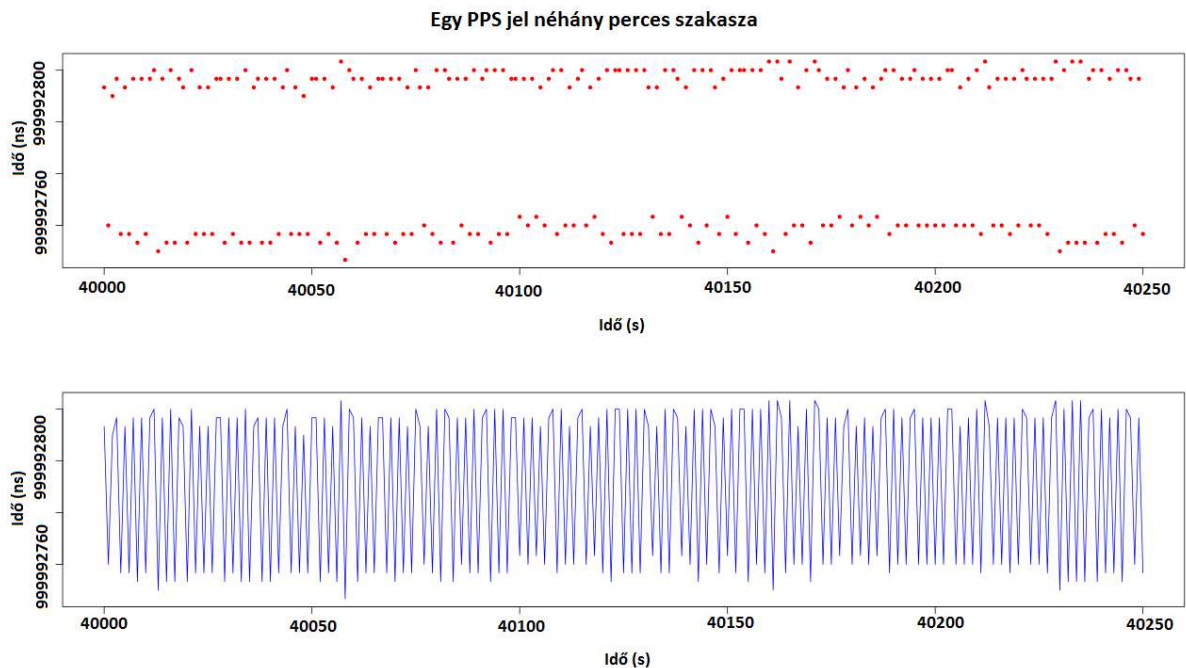
A mérő rendszer tesztelése céljából zárt helységben is végeztünk egy mérést, amely során egyetlen GPS vevő modul kimeneteit vezettük be mindhárom soros és PPS bemenetre. Az időbélyegek maximum 1 egységnyi (10/3 ns) eltérést mutattak, ebből megállapítottuk, hogy mind a három PPS bemenet azonos módon viselkedik.



18. ábra – Egy GPS vevő bevezetve minden bementre, zárt helyiségben

Azt is észrevettük, hogy a PPS periódusidők szórása alacsony azokon a szakaszokon, ahol a modul nem kapott jelet és a szabadon futó belső órájával generálta a másodpercenkénti impulzusokat (18. ábra).

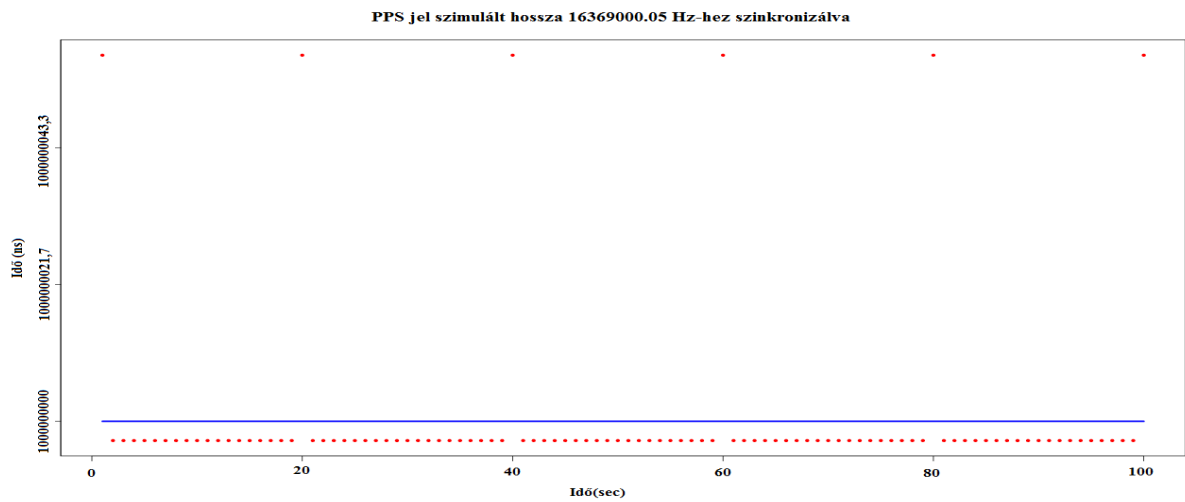
A 30 ns-os szórás okának keresésekor megvizsgáltuk az egyik PPS jel egy néhány perces szakaszát, minek következtében a 19. ábrán látható grafikont kaptuk.



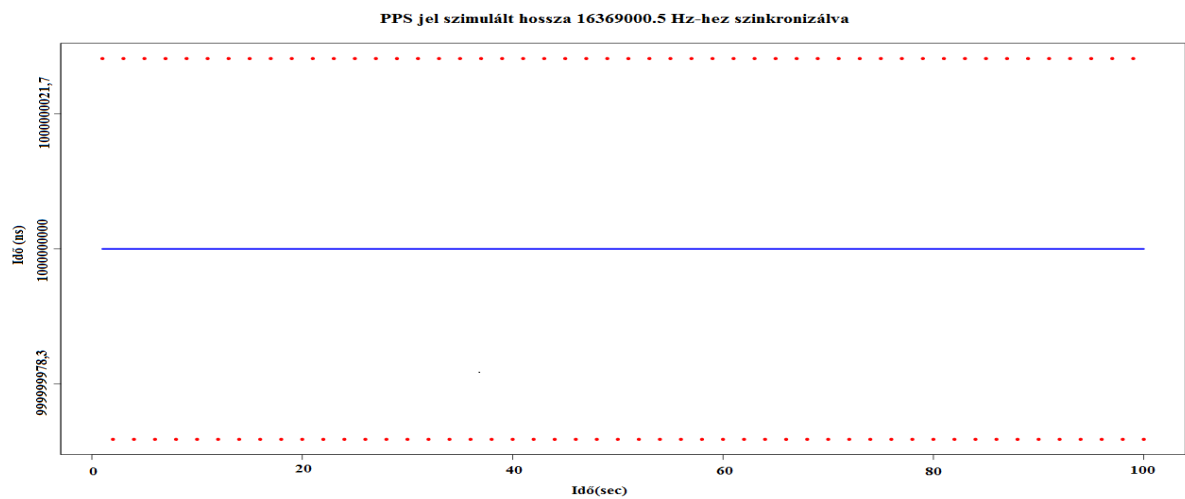
19. ábra - Egy PPS jel néhány perces szakasza

Látható, hogy a periódusidő csak diszkrét értékeket vehet fel, ez abból adódhat, hogy a GPS vevő modul PPS kimenete szinkronizálva van a belső órajeléhez. Ez az információ az adatlapjában nem szerepel, viszont a két felvett érték közötti különbség megegyezik az említett órajel periódusidejével.

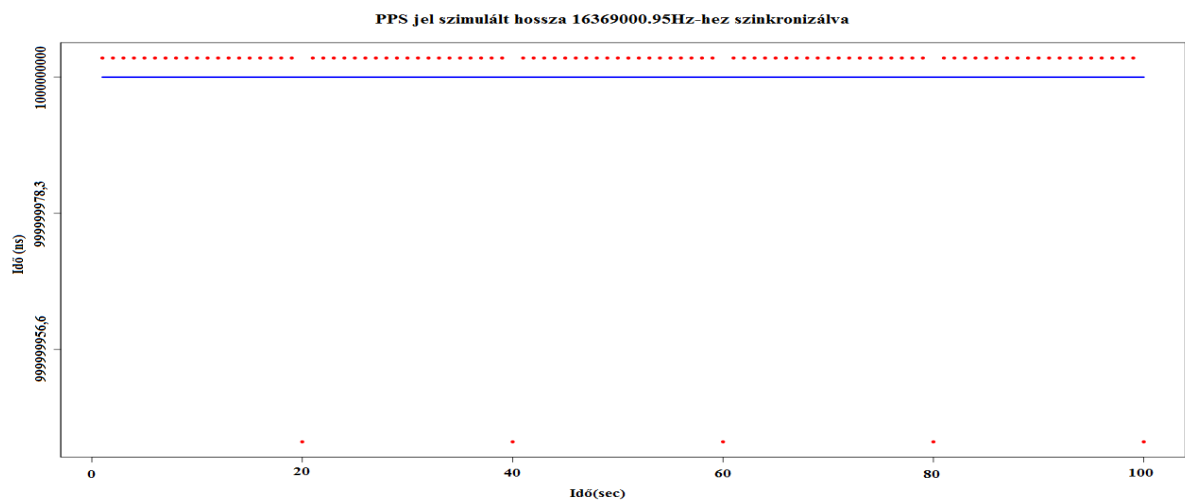
Egy 16369000,05 Hz-es órajelhez szinkronizált PPS jel periódusidejének alakulását szemlélteti a 20. ábra. Ahogy az látszik, egy ilyen egészhez közeli frekvencia esetén a periódusidő szórása alacsony, azonban ha az impulzusok késését nézzük, akkor az első impulzusnál a jel sokat késik, majd ezt a késést rövidebb periódusokkal lassan hozza be. Ennek az esetnek a párját mutatja a 22. ábra, ahol a PPS jel lassan késik, majd miután összegyűlt egy órajel periódusnyi késés, ezt egy rövidebb periódussal hozza be. A PPS jel periódusidőinek szórását nagyban meghatározza az a frekvencia, amelyhez a jel szinkronizálva van. A szórás akkor a legnagyobb, amikor ez a frekvencia Hz-ben mérve két egész között félúton van, ezt mutatja a 21. ábra. Ha a belső órajel forrás frekvenciája folyamatosan lassan változik, például 16369000,5 Hz-ről 16369001,5 Hz-re, akkor a PPS jel periódusidejének szórása előbb csökken, majd pedig növekszik, és a frekvencia további változásakor ez ismétlődik. Ez a jelenség a valós mérések során is megfigyelhető, jól látható a 17. ábra középső grafikonján.



20. ábra – PPS jel szimulált hossza 16369000.05 Hz-hez szinkronizálva

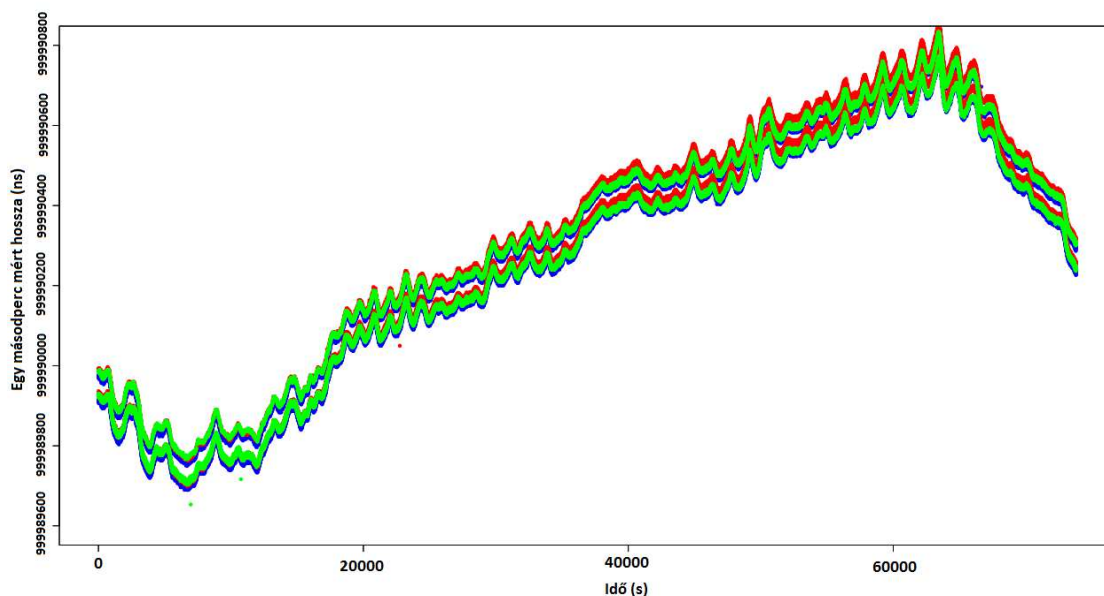


21. ábra – PPS jel szimulált hossza 16369000.5 Hz-hez szinkronizálva



22. ábra – PPS jel szimulált hossza 16369000.95Hz-hez szinkronizálva

Méréseink során megfigyeltük, hogy hosszabb távú változás következik be az egy periódus alatt megszámlolt órajelek számában. Látszólag a periódusidőben van változás, azonban jobban megfigyelve láthatjuk, hogy abban a referencia időben van, amellyel mérjük őket (23. ábra). Ennek során arra a következtetésre jutottunk, hogy az Atlys kártya órajel forrásának kimenete jelentősen függ a hőmérséklettől. A továbbiakban ezt is megvizsgáltuk.



23. ábra – Hosszabb távú változás megfigyelése

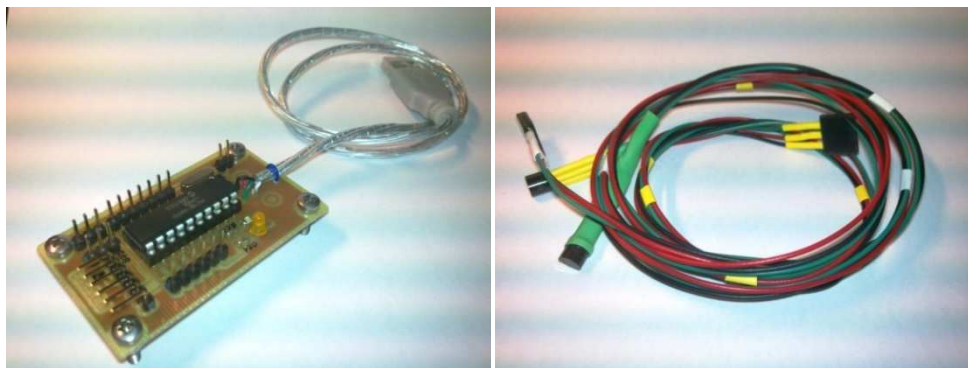
5.1 Hőmérsékletnaplózó eszköz

Mivel meg akartuk vizsgálni az Atlys kártya 100 MHz-es órajel forrásának hőmérsékletváltozását a mérés folyamán, ezért egy olyan hőmérőre volt szükségünk, amely kb. 1 másodperces felbontással méri a hőmérsékletet és naplózza azt számítógépen időbélyegezve. Ilyen eszköz természetesen a kereskedelmi forgalomban kapható, viszont nem állt rendelkezésünkre és beszerzése is sok időt vett volna igénybe, ezért készítettünk egyet. A hőmérsékletnaplózó rendszerrel szemben felállított követelményeink a következők voltak:

- könnyű kezelés
- kalibrált mérőszenzor
- adatok egyszerű naplózása
- rövid időn belüli elkészítés

Hőmérő szenzornak egy 18B20 [21] típusú integrált áramkört használtunk fel, mely jellemzője, hogy 0,5 °C fokos pontosságú a -10 °C-tól +85 °C-ig terjedő tartományban, 0,0625 °C fok a felbontása, illetve mérési tartománya -55 °C-tól +125 °C-ig terjed. Amint

megkap egy sort a számítógép, időbélyegzi azt és a standard outputra irányítja az így kapott kimenetet, amelyet majd egy fájlba irányíthatunk át. A mérőrendszer fel van készítve arra is, hogy akár 10 hőmérő-szenzort kezeljen.



a)

b)

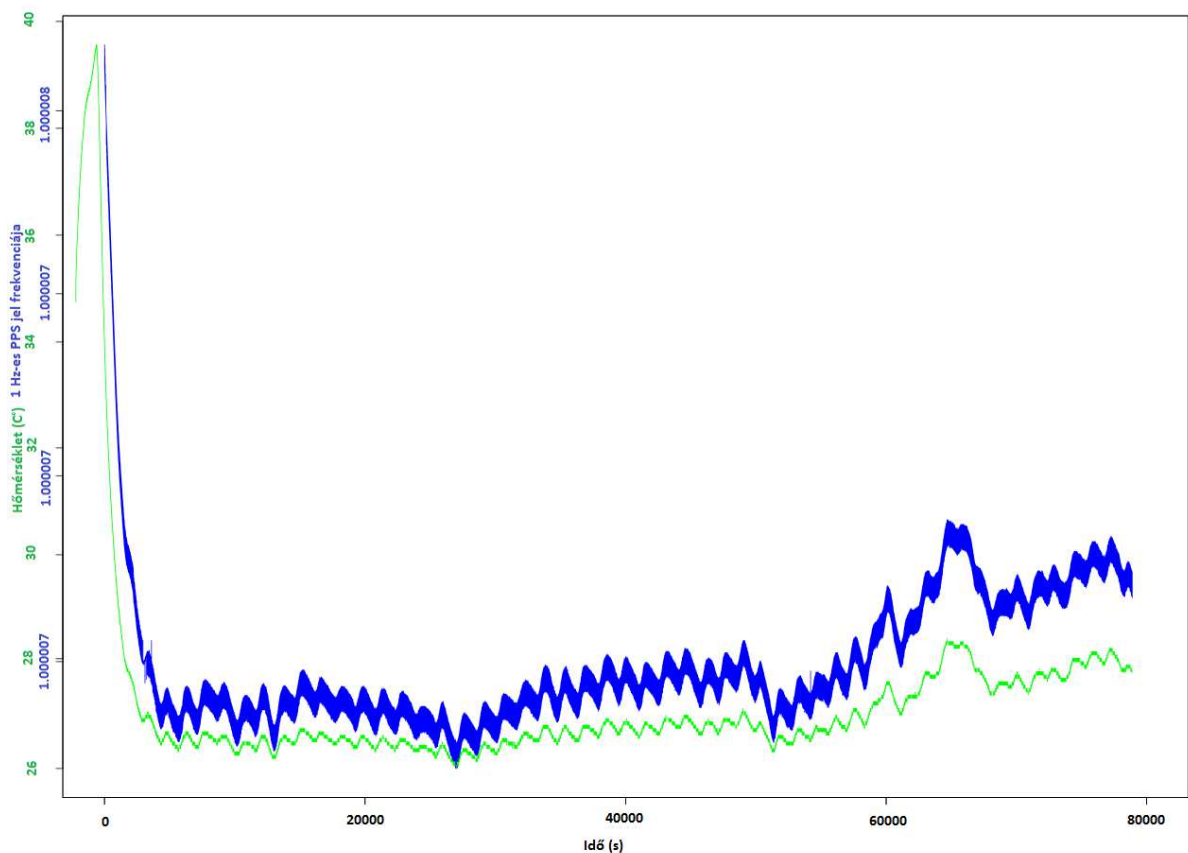
24. ábra – a) A hőmérő rendszer b) a hozzá köthető két hőmérő szenzor

A mérőrendszernek az általunk tervezett kapcsolási rajz alapján nyomtatott áramköri panelt építettünk, melyet a 24. ábra szemléltet. Mérni szerettük volna, hogy az Atlys kártyán lévő órajel forrásra miként van hatással a hőmérsékletváltozás. Ezért közvetlenül rá elhelyeztünk egy hőmérő szenzort, melyet ragasztószalaggal rögzítettünk, a szenzor és az integrált áramkör közzé hővezető pasztát kentünk (25. ábra). A hőmérő adatainak továbbítását egy *PIC18F14K50* [22] típusú mikrovezérlő végzi, mely a hőmérőkkel one-wire (egy vezetékes) buszon keresztül kommunikál, a mért hőmérsékleti értékeket pedig már tízes számrendszerben, ASCII karakterekként küldi tovább USB interfészen keresztül a számítógép számára. A hőmérő rendszer elkészítése után ismét végeztünk egy mérést, ahol így már az órajel forrás hőmérsékletét is folyamatosan rögzítettük.



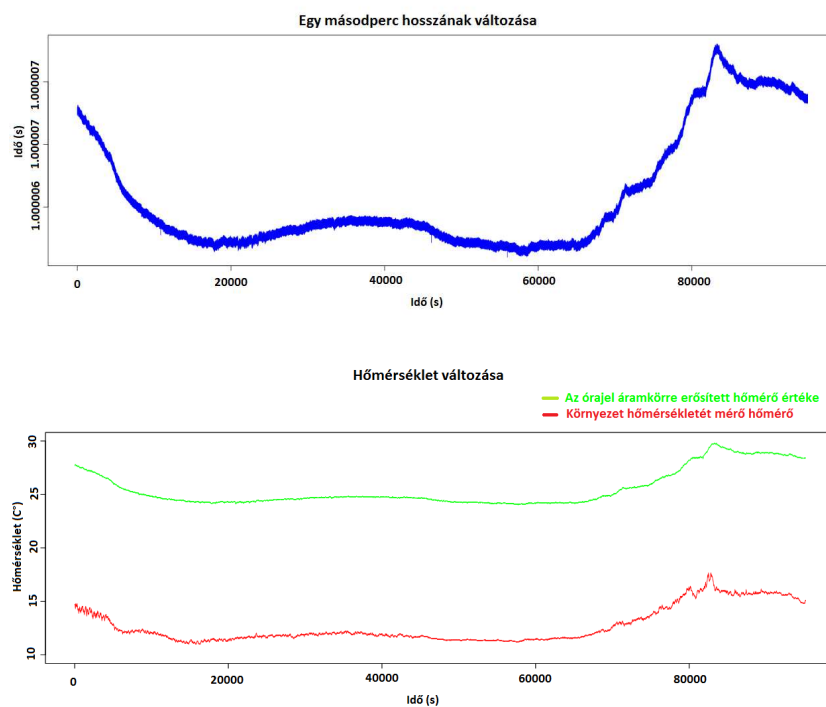
25. ábra – Az órajel forrásra rögzített hőmérő-szenzor

A mérés feldolgozása után arra a következtetésre jutottunk, hogy az órajel forrás periódusidejének változása jelentősen függ a hőmérséklettől, melyet a 26. ábra szemléltet. Ha megfigyeljük a grafikont, rövid idejű hullámokat vehetünk benne észre. Ezt a mérést ugyancsak az Informatikai Kar épületének tetején végeztük a légkondicionáló berendezések mellett (melyek ventilátorai időszakosan bekapcsoltak). Ellenőrzésképpen készítettünk egy további mérést is (itt már a környezet hőmérsékletét is mértük), ami egy másik helyszínen készült (egy garázs tetején). Ezen a helyen nem volt semmilyen hőtermelő eszköz és ez a grafikonon is megmutatkozik (27. ábra).

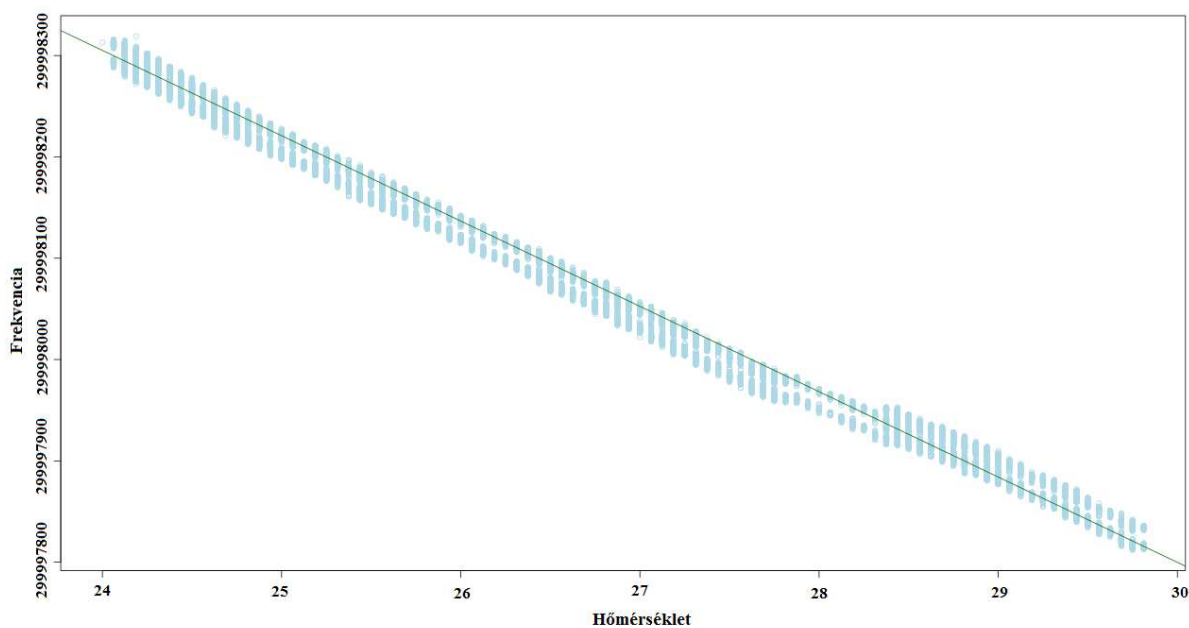


26. ábra – Az Atlys fejlesztőpanel órajel forrásának hőmérsékletfüggése

Annak érdekében, hogy meghatározzuk, hogy az órajel forrás frekvenciája hogyan függ annak hőmérsékletétől, lineáris regressziót számítottunk (28. ábra), mely kimutatta, hogy a két adatsor lineárisan függ egymástól.



27. ábra – Az órajel forrás hőmérsékletfüggésének ábrázolása más mérési körülmények között



28. ábra – Lineáris regresszió a hőmérsékletre és a frekvenciára vonatkozóan

Így a mérés során megállapítottuk, hogy az Atlys kártya órajel forrásának frekvenciájának hőmérsékletfüggése ilyen precíz mérési feladatban jelentős. Ennek ellenére mérési eredményeink hitelesnek tekinthetők, mivel a 2 perc lefolyása alatt az órajel forrás

periódusideje nem változik annyit, hogy az eredményt megváltoztassa. Azt a mozgóátlag-intervallumot nem lehet megadni, ahol az Atlys kártya órajelforrásának hőmérsékletfüggése nem jelentkezik, de két perces mozgóátlag használatakor (15. ábra) ez a jelenség nem figyelhető meg annyira, mint például tíz perces mozgóátlag esetében (16. ábra).

5.2 Konklúzió

Következtetésként levonhatjuk, hogy ilyen általános célú GPS modulok felhasználásával az **50 ns-os együttfutás nem garantálható**, mivel a vevő PPS kimenete a belső – 16 MHz-es – órajel forráshoz van szinkronizálva. Viszont biztosítani lehet a 100 ns-on belüli együttfutást, amelyet méréseinkkel is alátámasztottunk.

Vegyük azt az esetet, amikor a modul belső órajele Hz-ben kifejezve egész szám vagy megközelítőleg egész, ilyenkor a modul által kiadott PPS jel a valódi másodperchatár után mindig ugyan annyi késéssel kezdődik, és ez a késés bármennyi lehet 0-tól 60 ns-ig. Ha az egyik modul mindig 2 ns-ot késik, a másik pedig 56 ns-ot, akkor a különbség 54 ns. Ez az állapot hosszú ideig is fennmaradhat, ráadásul minél stabilabb a modul belső órajele, annál nagyobb a valószínűsége, hogy gyakorlatban is hosszú ideig változatlan marad, emiatt ezen nem tudunk semmilyen szűréssel javítani.

Vizsgálataink során igyekeztük megvizsgálni, hogy a pontosságot milyen tényezők befolyásolják. Ennek érdekében különböző időjárési körülmények között végeztünk méréseket. Utólagos következtetéseink során kimondhatjuk azt, hogy a modulból érkező PPS jelek belső órajelhez szinkronizálásából adódó hiba jóval nagyobb, mint azok az eltérések, melyeket az időjárás változás, és a különböző antenna elrendezés okozott. Ebből kifolyólag a DOP értékeknek és a műholdak jel/zaj arányának sem észleltük a pontosság befolyásoló hatását a PPS szórásra nézve.

Sikerült összeállítanunk egy olyan mérőállomást, mely segítségével meg tudjuk állapítani egy PPS kimenettel rendelkező modulról, hogy az milyen időszinkronizációs feltételeket képes teljesíteni.

6. Összefoglalás

Dolgozatunk során arra igyekeztünk fényt deríteni, hogy a kereskedelmi forgalomban kapható, általános célú GPS vevő modulok alkalmasak-e arra, hogy hálózatmonitorozó eszközök óráit úgy szinkronizáljuk, hogy a mutatott idők közötti eltérés ne legyen 50 ns-nál nagyobb.

Méréseinkhez három egyforma GPS modult használtunk FPGA alapú feldolgozó kártyával, a mért adatokat pedig számítógépen rögzítettük. Adatfeldolgozás és további mérések illetve fejlesztések során arra a következtetésre jutottunk, hogy ezek a GPS modulok nem alkalmasak arra a feladatra, amelyet a követelmények támasztanak, vagyis nem lehet biztosítani azt, hogy két GPS modul segítségével meghatározott idő között a különbség kisebb legyen 50 ns-nál. Habár több úton próbáltuk körbejárni a problémát, melyek során olyan környezeti tényezőket vizsgáltunk meg, mint az időjárástól való függés, antenna elrendezés, GPS műholdak jel/zaj arányának és egyéb paraméterek befolyása a mérésre, láthattuk, hogy ennek az az oka, hogy a GPS modul hőmérsékletkompenzált órajel forrása ~16 MHz-es, melynek periódusideje, ~62,5 ns, a GPS modulok PPS kimenetei pedig ehhez vannak szinkronizálva. A GPS modulok gyártójától szerzett információk alapján ez a 16 MHz tipikusnak mondható, illetve az is, hogy a PPS kimenetek is ehhez vannak szinkronizálva. Így ha pontosabb időszinkronizáló eszközre van szükségünk, direkt, erre a célra kifejlesztett eszközt kell beszerezni.

Összességében véve elmondhatjuk, hogy ez a vevő költséghatékony megoldást jelenthet 10 Gbit/s-os hálózati monitorozó eszközök lokális óráinak szinkronizálásához.

7. További tervek

Jövőbeni terveink során több féle GPS vevőt is össze szeretnénk hasonlítani, melyek során meg kívánjuk határozni, hogy az általunk levont következtetések mennyire igazak más, általános célú GPS vevők esetén, így hogy tudjuk, hogy milyen paraméterekre kell koncentrálni. Ezek alapján sokkal könnyebb lesz egy modulról megállapítani, hogy megfelel-e a célunknak vagy sem. Érdekes megvizsgálni olyan vevőket is, melyek nem SiRFStarIII chipset alapúak –mint az általunk felhasznált vevők – hanem vagy régebbiek, vagy újabbak. Továbbá tervezzük geodéziai mérések során használt GPS vevő bevonását is a mérési sorozatokba, mely referenciaként szolgálhat esetünkben mind az időt, mind a pozíciót tekintve.

8. Ábrajegyzék

1. ábra - Gerinchálózati topológia (Forrás: http://www.niif.hu)	4
2. ábra - 1 másodpercre vonatkozó NMEA mondat	9
3. ábra - FASTRAX IT321 és a nyomtatott áramkör	10
4. ábra – Spartan 6-os FPGA Atlys fejlesztőpanelen (Forrás: www.digilentinc.com).....	11
5. ábra - A három GPS vevő egy nyomtatott panelre rögzítve.....	12
6. ábra – A teljes mérőrendszer	12
7. ábra – A PPS jel felfutási ideje.....	13
8. ábra – A mérőrendszer elvi felépítése	14
9. ábra – A PPS jelek időbélyegzésének szimulációja	14
10. ábra – PPS jelek generálása tesztelés céljából Altera DE2-es panelen	15
11. ábra – A generált PPS-jelek fogadásának ábrázolása.....	16
12. ábra – Kétféle mérési módszer az Informatika Kar tetején: a) az antennák távol vannak egymástól; b) az antennák szorosan egymás mellett vannak	18
13. ábra – PPS idők közti különbségek hisztogramja különböző körülmények között.....	19
14. ábra - 10 másodperces mozgó átlag és szórás.	20
15. ábra - 2 perces mozgó átlag és szórás.....	21
16. ábra - 10 perces mozgó átlag és szórás.....	22
17. ábra - Egy másik mérés 2 perces mozgó átlagja és szórása.....	23
18. ábra – Egy GPS vevő bevezetve minden bementre, zárt helyiségben.....	24
19. ábra - Egy PPS jel néhány perces szakasza	25
20. ábra – PPS jel szimulált hossza 16369000.05 Hz-hez szinkronizálva	26
21. ábra – PPS jel szimulált hossza 16369000.5 Hz-hez szinkronizálva	26
22. ábra – PPS jel szimulált hossza 16369000.95Hz-hez szinkronizálva	26
23. ábra – Hosszabb távú változás megfigyelése	27
24. ábra – a) A hőmérő rendszer b) a hozzá köthető két hőmérő szenzor.....	28
25. ábra – Az órajel forrásra rögzített hőmérő-szenzor	28
26. ábra – Az Atlys fejlesztőpanel órajel forrásának hőmérsékletfüggése.....	29

27. ábra – Az órajel forrás hőmérsékletfüggésének ábrázolása más mérési körülmények között	30
28. ábra – Lineáris regresszió a hőmérsékletre és a frekvenciára vonatkozóan	30

9. Irodalomjegyzék

- [1] The Network Time Protocol
<http://www.ntp.org> [Letöltve: 2012. október]
- [2] Precision Time Protocol
<http://www.ieee1588.com> [Letöltve: 2012. október]
- [3] Official U.S. Government information about the Global Positioning System
<http://www.gps.gov/> [Letöltve: 2012. október]
- [4] Coordinated Universal Time
http://en.wikipedia.org/wiki/Coordinated_Universal_Time [Letöltve: 2012. október]
- [5] Jörg Micheel, Stephen Donnelly, Ian Graham: „*Precision timestamping of network packets*”, Proceeding IMW '01 Proceedings of the 1st ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement
- [6] Fendler Tamás: „Különlegesen nagyfinomságú időpecsételési módszer kialakítása FPGA alapokon”, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (2011)
- [7] Wing, Michael G., Eklund, Aaron, Kellogg, Loren D.: „*Consumer-Grade Global Positioning System (GPS) Accuracy and Reliability*”, Journal of Forestry, Volume 103, Number 4, June 2005, pp. 169-173(5)
- [8] Symmetricom – Rubidium Frequency Standard
<http://www.symmetricom.com/products/frequency-references/rubidium-frequency-standard/> [Letöltve: 2012. október]
- [9] Rubidium Atomic Clock Technology
<http://www.accubeat.com/apage/17540.php> [Letöltve: 2012. október]
- [10] What is SBAS?
<http://www.egnos-portal.eu/discover-egnos/about-egnos/what-sbas>
[Letöltve: 2012. október]
- [11] EGNOS Portal
<http://www.egnos-portal.eu/> [Letöltve: 2012. október]

- [12] Wide Area Augmentation System
http://en.wikipedia.org/wiki/Wide_Area_Augmentation_System
[Letöltve: 2012. október]
- [13] Richard B. Langley: „*Dilution of Precision*”, GPS World, (1999 may)
- [14] NMEA data
<http://www.gpsinformation.org/dale/nmea.htm> [Letöltve: 2012. október]
- [15] SiRF Binary Protocol Reference Manual,
http://gpsd.googlecode.com/files/SiRF-SiRF-v2_4.pdf [Letöltve: 2012. október]
- [16] The R Project for Statistical Computing
<http://www.r-project.org/> [Letöltve: 2012. október]
- [17] Fastrax IT321
<http://www.fastraxgps.com/products/gpsmodules/300series/it321> [Letöltve 2012. október]
- [18] Varga M., Pogár I., Varga P., Mate A. Vegh J. (2012): „*Developing sensors and real-time controlling software for a robot*”, Carpathian Control Conference (ICCC), 2012 13th International, High Tatras, Podbanské, Slovak Republic, May 28-31 2012 pp 752-756.
- [19] Atlys™ Spartan-6 FPGA Development Board
<http://www.digilentinc.com/Products/Detail.cfm?NavPath=2,400,836&Prod=ATLYS>
[Letöltve: 2012. október]
- [20] Altera DE2 Development and Education Board
<http://www.altera.com/education/univ/materials/boards/de2/unv-de2-board.html>
[Letöltve: 2012 október]
- [21] DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer datasheet
<http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf> [Letöltve: 2012. október]
- [22] Microchip PIC18F14K50
<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en533924>
[Letöltve: 2012. október]

10. Saját munka leírása

A dolgozat teljes egészében a szerzők munkájának eredményeképpen született a témavezető szakmai irányítása mellett.

11. Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk Dr. Orosz Péter témavezetőnknek, aki végig rendelkezésünkre állt, és hasznos tanácsokkal látott el minket a kutatással illetve a dolgozattal kapcsolatban. Továbbá szeretnénk megköszönni Végh János tanár úr segítőkész munkáját, aki önzetlen módon mindig tudott ránk időt szakítani.