



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

SZOFTVERES GNSS VEVŐK JELFELDOLGOZÁSA

TDK DOLGOZAT 2012

Konzulens:

Dr. Rózsa Szabolcs

egyetemi docens

Általános és Felsőgeodézia Tanszék

Készítette:

Sáfár Tamás

Tartalomjegyzék

Rövidítések	3
1. Bevezetés.....	4
2. A szoftveres rádiózás (SDR)	5
3. A GPS-műholdak által sugárzott jelek és adatok	7
4. A jelfeldolgozás alapjai	10
A Fourier-transzformáció	12
5. A szoftveres GPS vevő felépítése	18
Az antenna	20
A szűrő.....	20
Az erősítő.....	21
A keverő és helyi oszcillátor	22
Az analóg-digitális átalakító	22
6. A GPS-méréseink feldolgozása.....	23
Műhold észlelés (acquisition).....	25
A jelkövetés (tracking)	26
Pozíciósámítás (positioning).....	27
7. Konklúzió, kitekintés	29
Irodalomjegyzék	30

Rövidítések

ADC	Analog-to-Digital Converter
BPSK	Binary Phase Shift Keying
DFT	Discrete Fourier Transform
FFT	Fast Fourier Transformation
FPGA	Field-programmable gate array
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HOW	Handover Word
IC	Integrated Circuit
IF	Intermediate Frequency
LHCP	Left-hand Circularly Polarization
PDOP	Positional Dilution of Precision
PLL	Phase lock loop
RHCP	Right-hand Circularly Polarization
RF	Radiofrequency
SDR	Software Defined Radio
TLM	Telemetry word
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio

1. Bevezetés

A szoftveres rádió (*SDR, Software-defined radio*) gyorsan fejlődő technológiája iránt óriási érdeklődést mutatnak a különböző globális helymeghatározó rendszerek (GNSS) fejlesztői és a vevőkészülék-ipar. Ennek oka, hogy az SDR a GNSS-szel való integrálása során különböző szabadfejlesztésű algoritmusok tesztelhetők és építhetők be az eddig ismert helymeghatározási eljárásokba. Ez óriási mértékű szabadságot kínál minden irányultságú fejlesztéshez, hiszen a legalapvetőbb elemi tényezők újradefiniálása lehetséges a helymeghatározási folyamat bármely szakaszában a szoftver által.

A műholdas navigáció történelmi kezdete során speciális katonai célokra kiélezve fejlesztették ki az első helymeghatározó rendszereket, köztük a NAVSTAR GPS-t is. Ez a későbbiekben hátrányként mutatkozott a felhasználók számára, ugyanis zárt technológiai megoldások és követelmények rendszere közé szorította őket a konstrukció, a hardveres kialakítás, a platform és a felhasználási lehetőségek területén.

Az SDR éppen azzal az előnnyel rendelkezik, hogy a jelenlegi számítástechnikai adottságok felhasználásával új fejlesztéseket és megoldásokat kínál a felhasználók szükségletének megfelelően. További járulékos előnye, hogy amennyiben a jövőben, ha módosítják a GPS/GNSS jeleket, nem feltétlen szükséges a vevő hardveres módosítása nagy költségek árán. A szoftveres fejlesztések bármikor módosíthatók, finomíthatók a GNSS mérések céljához igazodva.

A szoftveres vevők platform függetlenek és bármely ismert rendszer műholdjából sugárzott jelek vételére alkalmasak (*NAVSTAR GPS, GALILEO, GLONASS, stb.*). Ezen felül nagy előnyük, hogy minimalizálják a hardveres költségeket és konstruktív kötöttségeket.

Jelen tanulmány a szoftveres GPS technológiáját kívánja bemutatni a jelfeldolgozás szempontjából, valamint kitekintést kíván nyújtani az esetleges alkalmazási lehetőségeiről és felhasználásáról.

A tanulmányban az egyszerűség kedvéért kizárólag a NAVSTAR-GPS jeleinek feldolgozásával foglalkozunk, az egyéb GNSS rendszerek jelfeldolgozását figyelmen kívül hagyva.

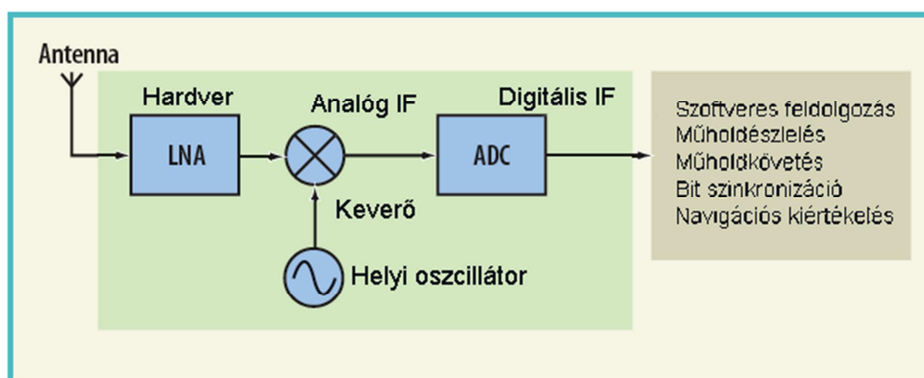
2. A szoftveres rádiózás (SDR)

A szoftveres rádió – rövid nevén SDR – egy olyan rádiókommunikációs rendszer, amelynek jelfeldolgozási folyamatait a hagyományos technológiától eltérően nem hardverek (pl. keverők, szűrők, erősítők, modulátorok/demodulátorok, érzékelők, stb.), hanem személyi számítógépen vagy beágyazott rendszeren működő szoftverek hajtják végre.

A lényege, hogy nem analóg módon operálva próbáljuk demodulálni a beérkező rádiófrekvenciás jeleket, hanem amint lehet analóg-digitális átalakítón keresztül számokká konvertáljuk a pillanatnyi feszültséget, és ettől kezdődően matematikai alapokon dolgozzuk fel az információt. Ebben a megközelítésben a jelfeldolgozó kód magas szintű, széles körben elterjedt programozási nyelven készül.

Noha az SDR koncepciója nem újdonság, a digitális elektronika gyors ütemű fejlődése teszi lehetővé számos gyakorlati folyamatban való hasznosítását, amelyek korábban csak elméletileg voltak lehetségesek.

Egy alapvető SDR rendszer általában egy személyi számítógépből és egy analóg-digitális átalakítót tartalmazó rádiófrekvenciás egységből, azaz *RF front-end*ből áll, amely a beérkező RF jelet középfrekvenciás (*IF*) jellé alakítja át. Ezáltal a jelfeldolgozás legnagyobb számítási igényű részét átadják egy általános célú számítógép-processzornak, ahelyett, hogy a vevőkészülék speciális hardver egységeiben menne végbe a folyamat.



1. ábra: Egy szoftveres GPS vevő egyszerűsített blokk-diagramja.

A szoftveres rádiókat különösen a katonai és mobiltelefon szolgáltatások hasznosítják, amelyeknek egyaránt kell kiszolgáltatnia sokféle változó protokollt valós időben.

Általános céljuk, hogy a rádiót megvalósító hardverek sokféleségét csökkentsék, továbbá lehetővé tegyék, hogy egyetlen hardver használatával különböző kommunikációs technológiákat alkalmazó hálózatok elérhetővé váljanak a felhasználók számára.

A GNSS evolúció során számos különálló rendszer épült ki, amelyek állandóan változó kontextusában a megbízható és flexibilis vevők élveznek előnyt számos alkalmazási területen, mint például a kutatás, kereskedelem, civil vagy katonai felhasználás. Flexibilitás alatt értendő a könnyű fejleszthetőség és újraprogramozhatóság a jövőbeni különböző jeltípusok vételére. A szoftveres rádió műholdas helymeghatározásban való szerepe hatékonyan képes egyesíteni ezeket a szempontokat, célokat.

A már említett előnyök mellett természetesen hátrányok is mutatkoznak az analóg feldolgozáshoz képest: így például a valós idejű felhasználás még nem megoldott, valamint a digitális állományok méretéből adódóan nagy számítási kapacitásra, memóriára van szükség.

3. A GPS-műholdak által sugárzott jelek és adatok

A GPS-műholdak fedélzetén működő oszcillátorok $f_0=10,23$ MHz alapfrekvenciájából eredően két különböző frekvencián generálják és sugározzák a rádiójeleket. Az L_1 jelű frekvenciája az alapfrekvencia 154-szerese, az L_2 jelűé pedig a 120-szorosa:

$$f_1=154 f_0=1575,42 \text{ MHz},$$

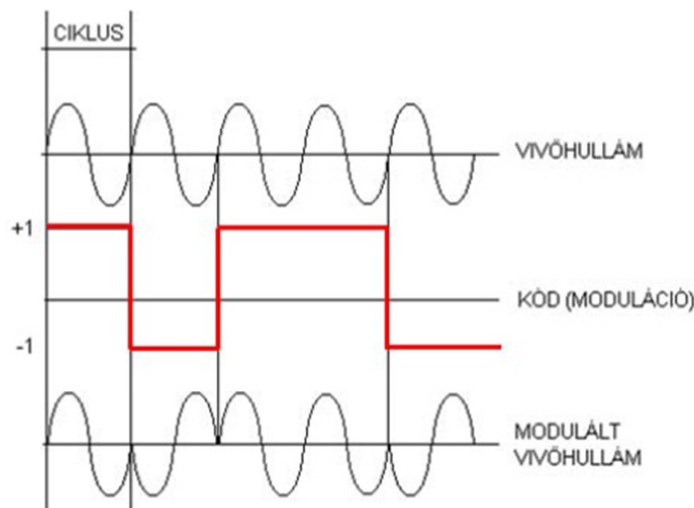
$$f_2=120 f_0=1227,60 \text{ MHz}.$$

Ennek megfelelően a hullámhosszuk:

$$\lambda_1=19,03 \text{ cm},$$

$$\lambda_2=24,42 \text{ cm}.$$

Ezek a vivőhullámokat (*carrier*) különböző kódokkal modulálják annak érdekében, hogy információkat továbbítsanak a vevő felé. A kódok +1 és -1 értékekből álló sorozatok, a kettes számrendszerbeli 0 és 1 számoknak megfelelően. A kódolás a fázisbillentyűzés (*Binary Phase Shift Keying, BPSK*) elvén működik, azaz a vivőhullám fázisának 180° -os ugrásszerű változása következik be, ha a kód értékében (+1 vagy -1) változás történik. Ezt az alábbi ábra szemlélteti:

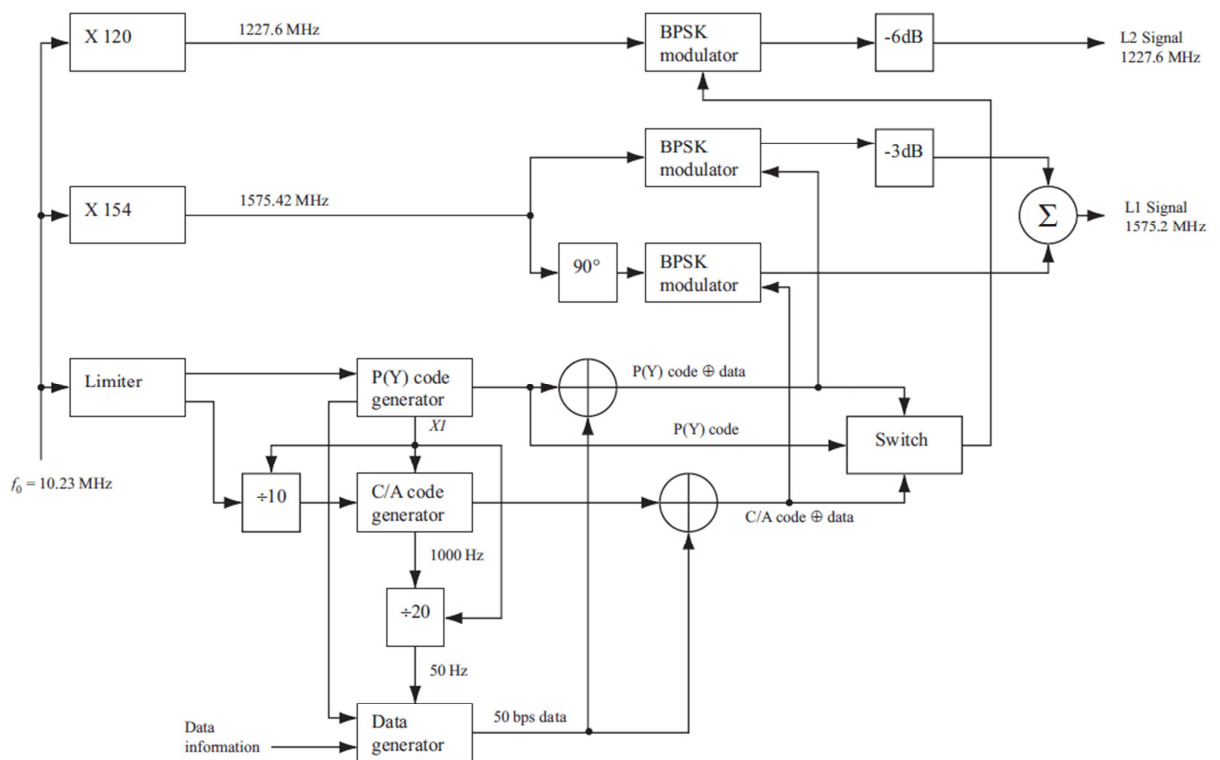


2. ábra: Fázisbillentyűzés a vivőhullámon

A vivőhullám modulálásakor kétféle kódolást alkalmaznak, ezeket álvéletlen zajnak (*pseudorandom noise, PRN*) nevezik. A C/A kód (*coarse/acquisition code*) frekvenciája $f_0/10$, azaz 1,023 MHz-es frekvenciával követik egymást a +1 és -1 értékek. A kódsorozat

minden ezredmásodpercben ismétlődik, és minden GPS műhold esetén különböző, így ez teszi egyértelműen azonosíthatóvá a műholdakat. A P-kód (*precision code*) frekvenciája megegyezik az f_0 alapfrekvenciával és 266,4 naponta ismétlődik. A P-kód teljes ciklusának egyhetes szakaszait rendelték hozzá egy-egy műholdhoz, így ez esetben a kód „mintájának” egyedisége azonosítja egyértelműen a műholdakat, melyek maximális darabszáma 38 lehet.

Az L2-t csak a P-kóddal, az L1-et mindkét kóddal modulálják. Ezeken kívül használatba lépett már az L5-ös vivőhullám is, amely a polgári légi navigáció biztonságát hivatott javítani. Katonai, titkosított célokra pedig az M (military) vagy P(Y) kódot használják.

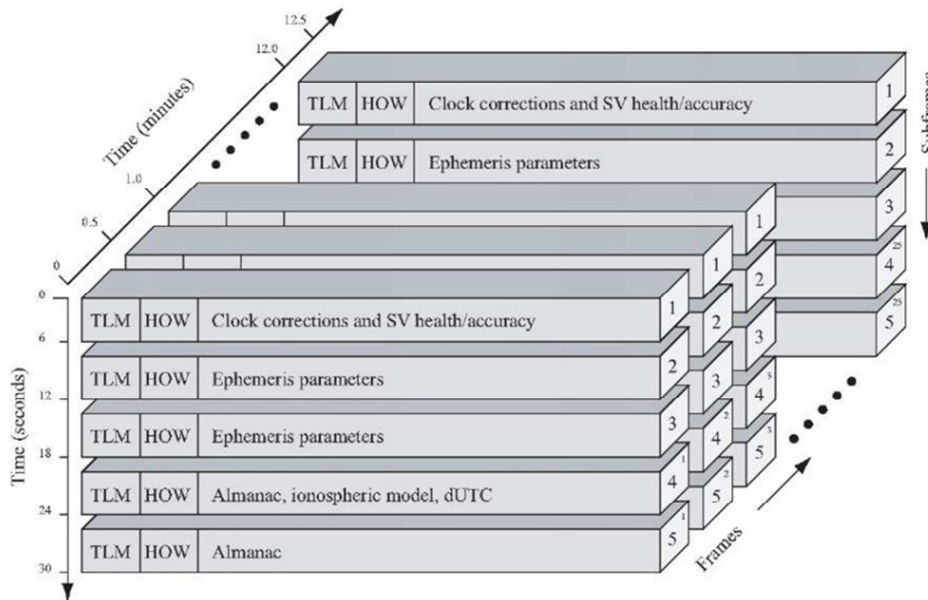


3. ábra: A GPS jelek generálásának blokk-diagramja

A már említett vivőhullámok és kódolások mellett a harmadik fontos komponense a GPS jelnek a navigációs adatcsomag. Ezt valamennyi műhold mindkét frekvencián sugározza 30 sec hosszúságú egységekbe (*frame*) foglalva, 50 bps adatsebességgel. Maga az üzenet 1500 bit hosszúságú és 5 darab 6 sec hosszú alrészből (*subframe*) áll. Minden egyes alrész tíz, egyenként 30 bitből álló gépi szóra osztottak fel.

Minden egyes alrész a szinkronizációhoz szükséges két speciális szóval, a telemetriai szóval (*telemetry, TLM*) és az időinformációt hordozó szóval (*handover word, HOW*)

kezdődik. A TLM az alrészek szinkronizációjához szükséges, a HOW-ból pedig az aktuális GPS-hét kezdete óta eltelt idő határozható meg, amit másként héten belüli időnek (*time of week, TOW*) neveznek.



4. ábra: A GPS navigációs üzenetek adatstruktúrája

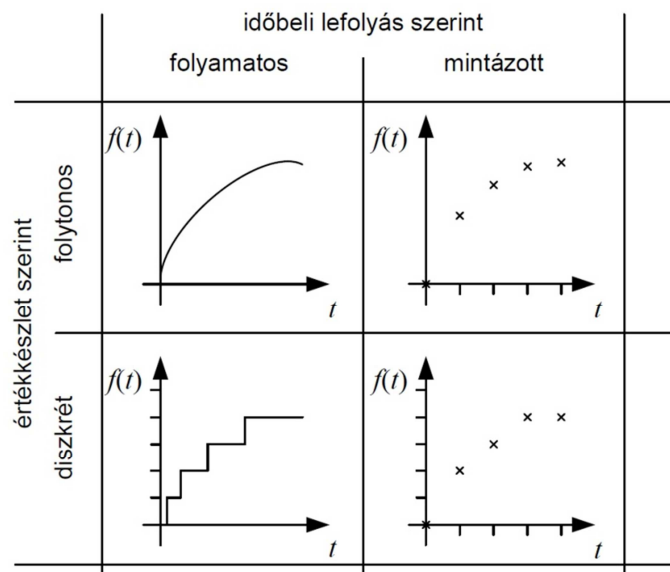
Az első alrészben találhatóak az óraparaméterek és a műholdak megbízhatósági paraméterei. A 2-es és a 3-as alrészekben az efemerisz adatok találhatóak, ezek a Kepler-féle pályaelemeket valamint azok korrekcióit tartalmazzák, amelyekből tetszőleges időpontra kiszámítható a műhold pillanatnyi pozíciója. A 4-es és 5-ös alrészek huszonöt oldalnyi egyéb információt tartalmaznak, amelyek legnagyobb része titkos. Ezek információtartalma azonban nem 30 másodperc alatt, hanem 12,5 perc alatt jelenik meg folyamatosan bővülve. Ide tartoznak többek között az ionoszféra-paraméterek és UTC paraméterek, valamint az almanach adatok, amelyek valamennyi műhold közelítő pálya- és óraadatait jelentik.

4. A jelfeldolgozás alapjai

A műholdas helymeghatározó rendszerek esetén két nagy csoportra oszthatjuk az információkat hordozó jeleket, így determinisztikus és sztochasztikus jelekről beszélhetünk. A determinisztikus jelek explicit matematikai kifejezésekkel modellezhetők, míg a sztochasztikus vagy véletlen jelek valamilyen szabálytalanságot mutatnak. Ilyen véletlen jelre kiváló példa a vételezett GPS jel, amely a helymeghatározáshoz szükséges információkat hordozó jeleken túl zajjal terhelt az atmoszférikus zavarok és a vevő áramkörében keletkező zajok által.

A jel definíció szerint valamely állapotváltozó minden olyan értéke vagy értékváltozása, amely egy egyértelműen hozzárendelt információ szerzésére, továbbítására vagy tárolására alkalmas. A jeleket a következőképpen osztályozhatjuk még a feldolgozás szempontjából:

- | | |
|------------------------------|-------------------------|
| • értékészlet szerint: | - folytonos |
| | - diszkrét (szakaszos) |
| • időbeli lefolyás szerint: | - folyamatos |
| | - diszkrét (szaggatott) |
| • meghatározottság szerint: | - determinisztikus |
| | - sztochasztikus |
| • megjelenési forma szerint: | - analóg |
| | - digitális |

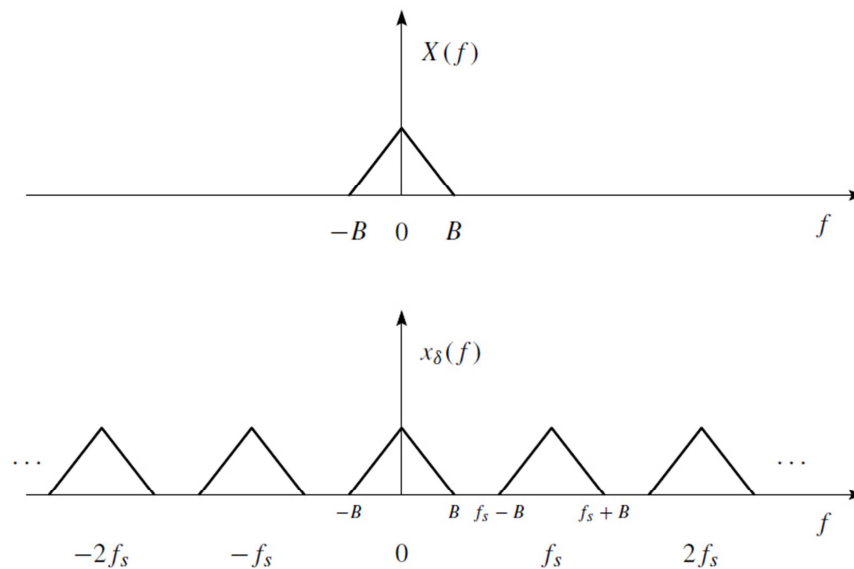


5. ábra: A jelek csoportosítása időbeli lefolyás és értékészlet alapján.

A szoftveres GPS jelvételezés két kritikus jelfeldolgozó művelete a mintavételezés (*sampling*) és a kvantálás. Ez tulajdonképpen az analóg jel digitalizálásának két fő lépése. Mintavételezéskor a jelek helye egyenlő osztályokra osztódik, majd egyenértékű reprezentatív jelekre cserélődnek az azonos osztályokban. A kvantálás alatt a reprezentatív jelek értékei egy véges készlet megközelítő értékeit veszik fel, vagyis az analóg jel amplitúdó értékei bináris számokká alakulnak.

A megfelelő minta eléréséhez teljesülnie kell a Nyquist-Shannon mintavételi elvnek, miszerint a mintavételezés frekvenciának a jel teljes sávszélességénél minimum kétszer nagyobbak kell lennie. Amennyiben ez nem teljesül, fellép az *aliasing-effektus*, vagyis a jel $X(f)$ frekvencia-eltolt komponensei átfedésbe kerülnek és a vételezett jel spektruma nem lesz hasonló az eredeti jelhez. Ehhez kapcsolódó fogalom a Nyquist-ráta:

$$f_s = 2B, \quad \text{ahol } f_s: \text{a mintavételezési frekvencia} \\ B: \text{a jel teljes sávszélessége (megfelelő szűrés esetén).}$$



6. ábra: A mintavételezési folyamat a frekvencia függvényében ($f_s > 2B$).

Ezen kívül a jelek csoportosíthatók még szűrési jellemzőik alapján, amelyek lehetnek aluláteresztő, sáváteresztő, felüláteresztő tulajdonságúak. A GPS rendszereket sáváteresztő tulajdonságú jelek alkotják, vagyis az információt hordozó jelet sávszűrő csatornákon

keresztül közvetítik a műholdakból a vevőkbe. Egy sáváteresztő jel általános alakja matematikailag a következő:

$$s(t) = a(t) \cos(2\pi f_c t + \varphi(t)), \quad \text{ahol } a(t): \text{a jel amplitúdója}$$

$\varphi(t)$: a jel fázisa

f_c : vivőfrekvencia.

A fent említett jel kvadratúra modulációval két komponensre bontható, amelyek 90°-os fázissal térnek el egymástól. Ez tulajdonképpen a kódolási folyamat alapja, amellyel az információt a vivőhullámra ültetik.

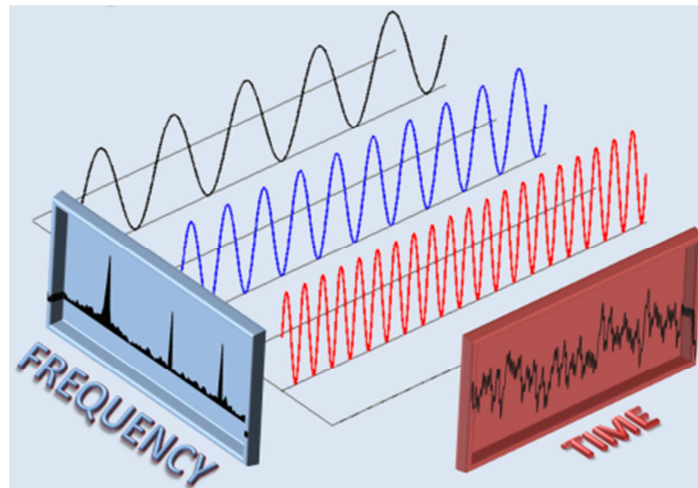
A szoftveres vevő által történő jelfeldolgozás igen sarkalatos pontja, hogy a kódolt jelet miként észleljük az ismert kód alapján. Ez esetben a cél a korreláció vizsgálata a bejövő jel és az ismert kód között (PRN). Ahelyett, hogy a bejövő jelet a PRN kód 1023 darab különböző kódfázisával sokszorosítanánk, sokkal kézenfekvőbb egy keresztkorrelációs vizsgálat végrehajtása a bejövő jel és az elcsúsztatott kódfázis nélküli PRN-kód felhasználásával.

A keresztkorrelációs vizsgálat matematikai alapja a Fourier-transzformáció.

A Fourier-transzformáció

Az analóg jelek digitális elemzéséhez szükséges elméleti matematikai alapok kidolgozása Jean Baptiste Joseph de Fourier francia matematikus nevéhez fűződik, aki felismerte azt a tényt, hogy a jelek az idő és a frekvencia tartományában részletesen jellemezhetők. Egyik tétele szerint minden periodikus függvényt különböző amplitúdó- és fázissúlyozó, harmonikus rezgésre lehet felbontani. Később az elméletet nemperiodikus folyamatokra, valamint diszkrét jelű és diszkrét értékű függvényekre is kiterjesztették.

A Fourier-sorba fejtés a jelfeldolgozásban alapvetően a jelek frekvenciatartományának előállítására szolgál. Tulajdonképpen kétirányú átjárhatóságot képez az időtartomány és a frekvenciatartomány között.



7. ábra: A jelek vizsgálata időtartományban és frekvenciatartományban

Egy analóg jelet T időtartamon belül Δt időközönként mintavételezve N minta keletkezik. A jel T szakaszának hosszúsága a megfigyelési idő vagy ablakszélesség. A Fourier-tételnek a véges analízisi idejű és mintájú, időben diszkrét jelekre való kiterjesztését Diszkrét Fourier-transzformációnak (*discrete Fourier transform, DFT*) nevezzük.

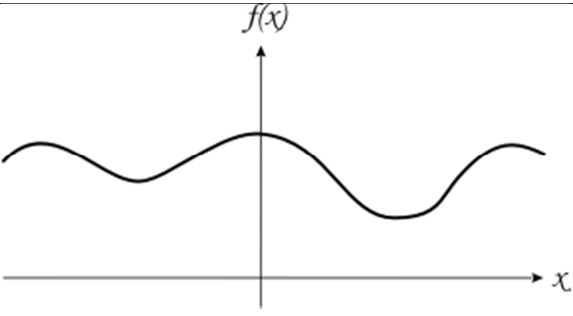
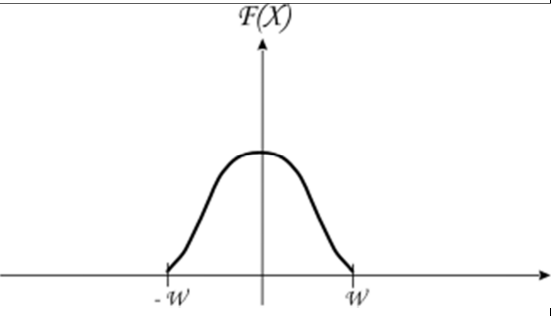
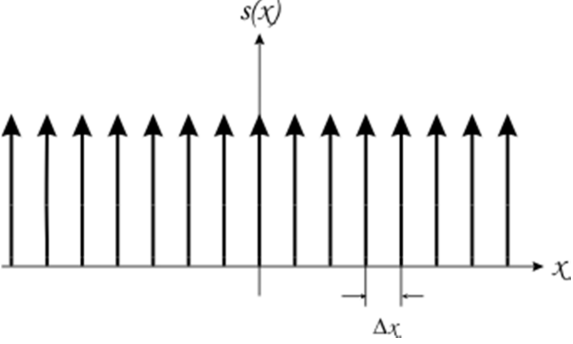
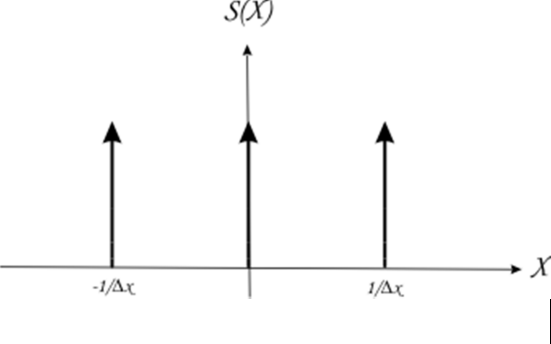
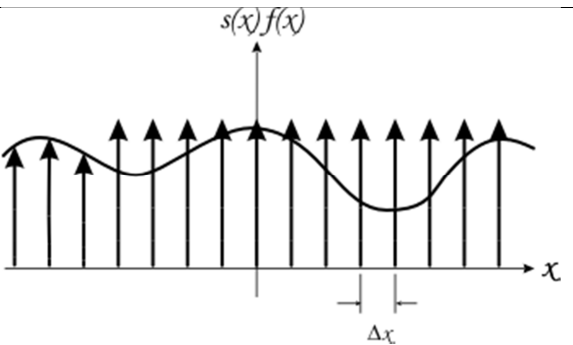
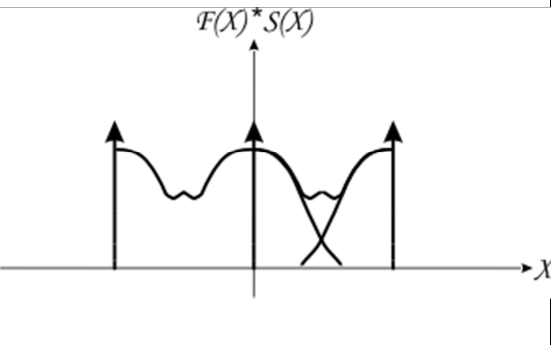
A teljes DFT meghatározásához N minta esetén összesen N^2 számú szorzási és összeadási műveletre van szükség. Eszerint N növekedésével a számítási idő jelentősen megnő. Ennek kiküszöbölésére találták ki a gyors Fourier-transzformációt (*fast Fourier transform, FFT*).

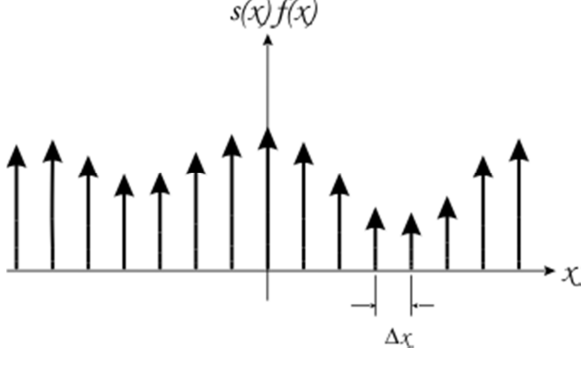
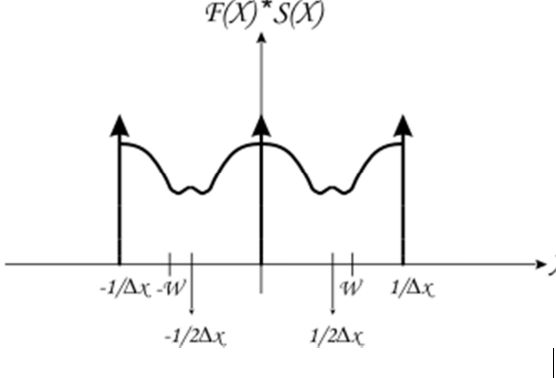
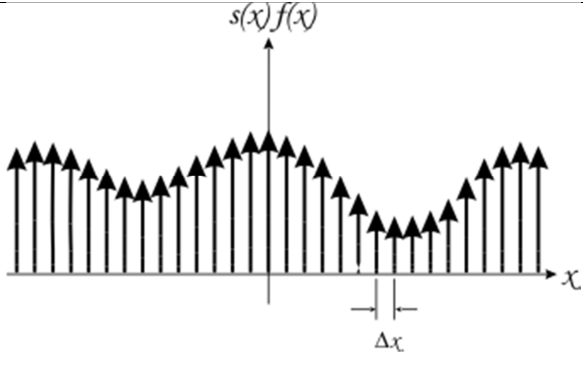
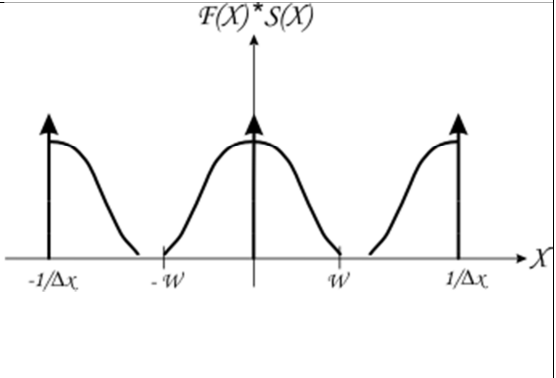
Az FFT a DFT időhatékony számítására alkalmas, azonban mindkét eset számszerű eredménye megegyező. Az eljárás akkor a legegyszerűbb, ha az ablak méretét (a jelfüggvény mintáinak számát) kettő hatványaként választjuk meg, ugyanis így az adatrész-készletet kettővel folyamatosan végzett osztásokkal kisebb blokkokra lehet felbontani, amelyekre külön-külön elvégezhető hatékonyan a DFT. Ezen kis blokkokra elvégzett diszkrét Fourier transzformációinak lineáris kombinációja adja a végeredményt.

Ezek alapján két jel keresztkorrelációs vizsgálatát úgy végzi el a szoftver, hogy az időtartományból áttér a frekvenciatartományba, majd, mint egy konvolúciós eljárás, az egyik referenciajelet (adott esetben a PRN) végigviszi a beérkező jelen a legmagasabb korrelációt vizsgálva.

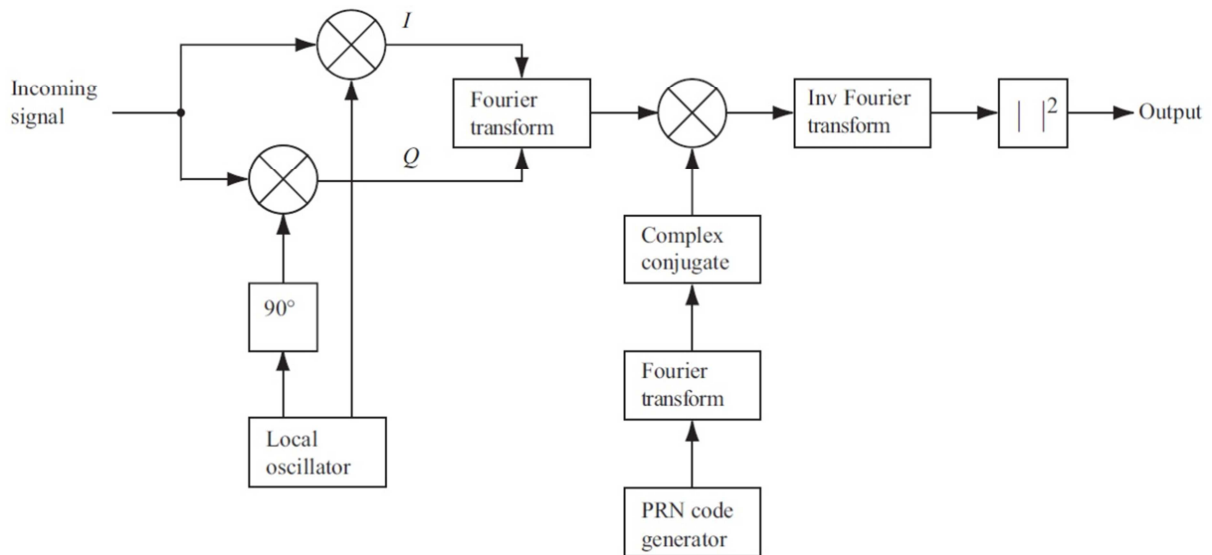
A konvolúció tételt mintavételezés esetén a következő képsorokon szemléltetjük:

Legyen $f(x)$ a beérkező analóg jelünk időtartománybeli (normál tér) képe egy adott időszakon. Ekkor az $F(x)$ ugyanazon jel képe a frekvenciatartományban (Fourier-tér), vagyis $f(x)$ Fourier-transzformáltja. Ez pedig a jelben előforduló frekvenciákat mutatja.

Időtartomány	Frekvenciatartomány
	
<i>Ez az f függvényünk (jel), amit mintavételezni szeretnénk.</i>	<i>Az f képe Fourier-térben.</i>
	
<i>Az s fésűs függvény a mintavételezési sűrűséget mutatja.</i>	<i>Az s képe a Fourier-térben.</i>
	
<i>Az normál érben egy jel mintavételezése egy fésűs függvénnyel való szorzásnak felel meg.</i>	<i>A konvolúció a normál térben megfelel a szorzásnak a frekvenciatartományban. (Ez fordítva is igaz.) Konvolúció tétel:</i>

$s(x)f(x) = sf(x) = \sum_{i=1}^N f(x)\delta(x - i\Delta x)$ $= f(x)\sum_{i=1}^N \delta(x - i\Delta x)$	$F(s(x)f(x)) = F(s(x)) * F(f(x))$ $= S(X) * F(X)$ Megkaphatjuk a mintavételezett jel Fourier-transzformáltját, ha a fésűs függvény és az eredeti jel Fourier transzformáltját konvolváljuk.
	
A kapott eredmények lesznek a digitális jelünk adatai.	A mintavételezett kép Fourier-transzformációja az eredeti folytonos kép periodikusan ismételt Fourier-transzformációinak összege. A túl ritka minták miatt a frekvenciatartományok átfedik egymást.
	
Sűrűbb mintavételezés esetén.	Nincs átfedés.

1. táblázat: Függvények konvolúciója a jelfeldolgozás során

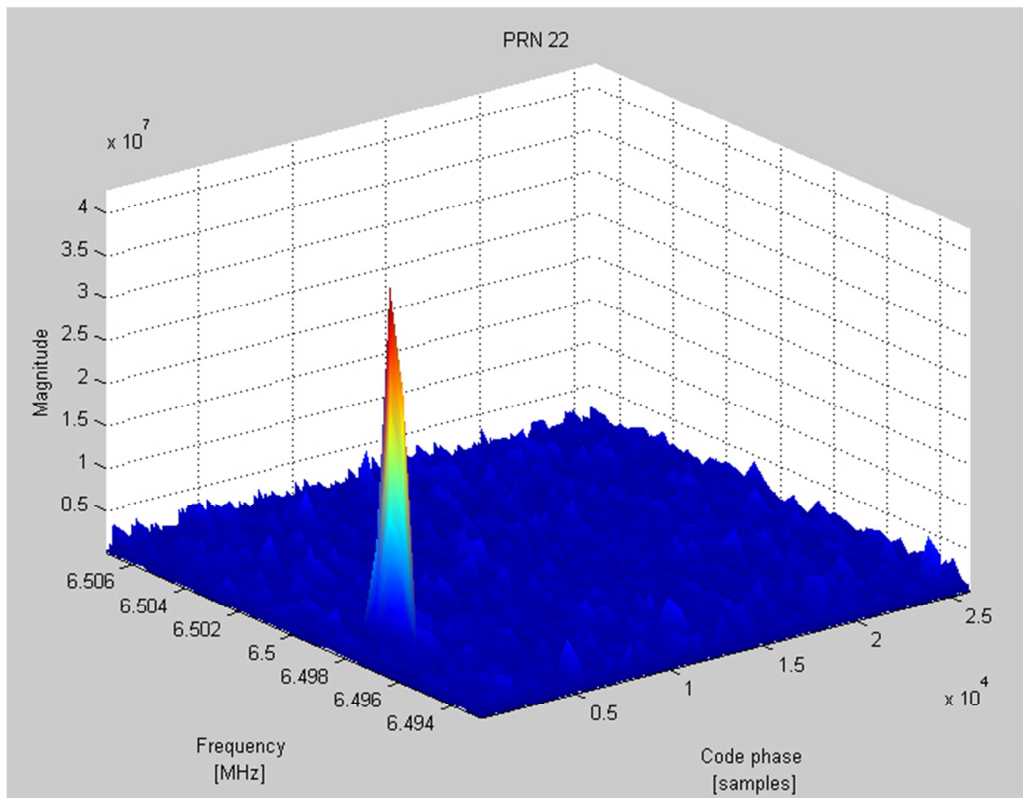


8. ábra: A PRN kódkeresési folyamat blokkdiagramja

A szoftveres vevő a bejövő jelet először egy lokálisan generált vivőjellel két komponensre bontja. Az egyik komponens az eredeti jel, I jel, a másik pedig a 90° -os fáziseltolású verziója a bejövő jelnek, ez a Q jel. Ezek kombinációja kerül Fourier-transzformálásra, majd a PRN-kód frekvencia tartományba transzformálása után ezeket összeszorozza az algoritmus, végül inverz Fourier-transzformációval visszaalakítja az időtartományba. A kimenet adja a korrelációt a beérkező jel és a PRN kód között.

A konvolúciós eljárás során csupán a kódfázis-késés és a korrelációs együttható értékeinek metszete áll elő. Mivel azonban a frekvenciatartományban Doppler-effektus jelentkezik a műhold és a vevő folytonos relatív mozgásából adódóan, különböző frekvencia értékek vizsgálatára van szükség a jel vételezéséhez. Az effektus hatása az L1-es vivőfrekvencián maximum 5 kHz abszolút értékű eltérést okoz. Így az FFT megoldást nem csak egy frekvencián, hanem a Doppler-csúszások maximális értéke alapján meghatározott frekvencia-tartományokban mintavételezett referenciajelekkel végzi el a szoftver.

Ennek ismeretében már egyértelműen azonosítható az adott műholdhoz tartozó frekvencia és kódfázis eltolódás. Amennyiben egy kimagasló érték, csúcs jeleneik meg a korrelációban, az jelöli a bejövő jel PRN-kód fázisának eltolását az adott frekvenciatartományban.



9. ábra: A beérkező jel és a PRN kód korrelációvizsgálata (műholdészlelés)

A fent említett módszer a műholdak észlelésére, azonosítására szolgál, ezt a következő fejezetekben tárgyaljuk.

5. A szoftveres GPS vevő felépítése

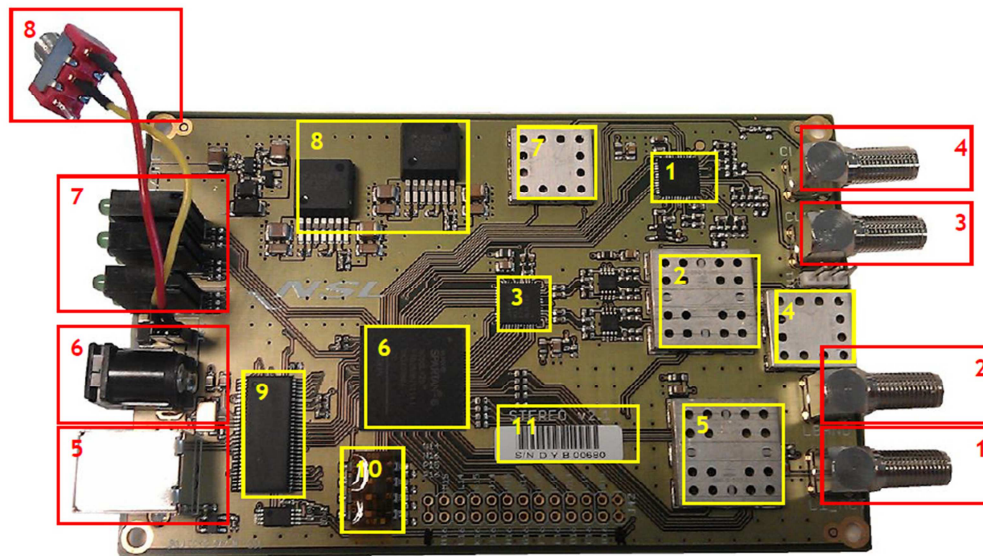
A méréseinket egy NSL sztereó GNSS vevőkészülékkel végeztük, a fejezetben ezen keresztül ismertetjük a szoftveres GNSS vevők felépítését az alacsony sávszélességű GNSS L1 jelek, elsősorban a GPS Coarse/Acquisition (C/A) kód vonatkozásában.

A GNSS jelek vételezése az atmoszférán keresztülhaladó rádióhullámok a vevő GNSS antennájába való „ütközéssel” veszi kezdetét. Ez elektromos feszültséget indukál az egységben, amely kifejezetten gyenge (-160 dBW). A vételezett jel erőssége a termikus zaj alá esik. Ebből következően a termikus zaj vételezése legalább annyira domináns, mint magáé a helymeghatározás célját szolgáló jelé és vivőhullámé. Megjegyezzük, hogy az L1 GNSS sávszélesség olyan frekvenciatartományban lett kialakítva, amelyben jelenleg más rádióhullámok nem zavarhatják a jel vételezését. Az analóg elektromos feszültség, amelyet a GPS jel és a termikus zaj együttese indukál, a gyengesége és magas frekvenciatartománya miatt alkalmatlan arra, hogy közvetlenül digitalizálásra kerüljön. Ennek áthidalására a front-end különböző egységeket tartalmaz a jel átalakítására, mint például erősítő, keverő, szűrő vagy saját oszcillátor.



10. ábra: Az NSL sztereó szoftveres GNSS vevő digitális front end

A vevő főbb egységeit a következő képen szemléltetjük:



11. ábra: A sztereó vevőkészülék felépítése

Főkomponensek	Interfészek
1. Precíziós órajelgeneráló egység	1. L1 antenna bemenet
2. RF front-end, hangoló áramkör	2. L-Band antenna bemenet
3. 8 bites analóg-digitál konverter (ADC)	3. Órakimenet
4. MMIC erősítők	4. Órabemenet
5. GPS/Glonass/Galileo/Compass front-end	5. USB foglalat
6. FPGA logikai blokkok	6. Tápfeszültség bemenet
7. Saját oszcillátor	7. Tápellátás és FPGA LED-ek
8. Tápegység modul	8. Be/Ki kapcsoló gomb
9. USB mikro vezérlő	
10. Felületi szerelésű kapcsoló	
11. Termékazonosító kód	

2. táblázat: Az NSL sztereó vevőkészülék felépítése

Az antenna

Az antenna jellemzően nem kötött része a front-end kiépítésnek, azonban ez az első komponens, amelyen a vételezett jel keresztülhalad, így röviden ennek tárgyalására is kitérünk.

Lényegében három fő paraméterrel jellemezhető egy antenna: *frekvencia/sávszélesség, polarizáció, karakterisztika*.

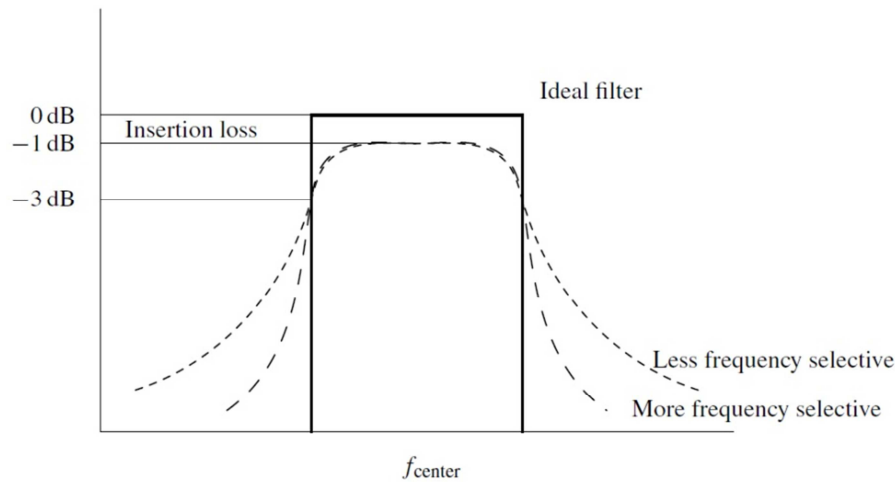
Az antennát a vételezni kívánt jelek sávszélességéhez alkalmazkodva tervezik, ezt pedig két paraméter befolyásolja: a *feszültség állóhullám-arány (Voltage Standing Wave Ratio, VSWR)*, vagyis az állóhullám-intenzitás mértéke és az *impedancia*. A rádiófrekvenciás vevők esetében, így a GNSS front-end vevőknél is általában 50 Ω -os impedanciát alkalmaznak. A VSWR a maximális és minimális feszültség aránya, amennyiben impedancia-illesztetlenség esetén a haladó hullámok teljesítménye reflektálódik és ezek eltérő fázisú szuperpozíciója miatt állóhullám alakul ki.

A polarizáció a rádiófrekvencia átvitelből adódó elektromágneses mező irányultságára utal. A vételezett GNSS jelek jobbkéz-szabály szerint cirkulárisan polarizáltak (*Right-hand circularly polarization, RHCP*), így az antennát is erre kell tervezni. A többutas terjedés (*Multipath*) esetén a reflektivitás törvényeiből adódóan megváltozik a polarizáció iránya (*Left-hand circularly polarization, LHCP*). Szerencsére az RHCP antennák meglehetősen hatékonyan elnyomják a visszaverődött LHCP polarizált jelek hatását, és minimalizálják az ebből eredő esetleges hibákat.

Az antenna karakterisztikája (*gain pattern*) írja le az antenna irányíthatóságát. A legalapvetőbb eset az lenne, ha az antenna minden irányból érzékelné a beérkező jeleket (*izotróp antenna*), azonban a GNSS antennák karakterisztikáját éppen az előzőleg említett többutas terjedés megfontolásából hemiszférikus, félgömb alakúra tervezik, hogy minden azimut irányból csak 10-20°-nál nagyobb pozitív magassági szögből érkező jeleket vegyen.

A szűrő

A szűrő az első komponense az RF front-endnek. Ez egy frekvencia-szétválasztó eszköz, amely a szükséges frekvenciákat továbbengedi, a többit pedig csillapítja. Az ideális szűrő úgy viselkedne, hogy a nem kívánt frekvenciatartományokban kiiktatja a jeleket, azonban ilyen nem létezik, csupán csillapítani lehet azok hatását. Ezt a következő ábra szemlélteti:



12. ábra: Sávszűrők összehasonlítása

A szűrők a beiktatási csillapításukkal (*insertion loss*) jellemezhetők, ez megmutatja, hogy a szűrő kimenetén mennyivel csillapodik a jel amplitúdója a bemeneti amplitúdóhoz képest. Megjegyezzük, hogy a jelerősítő elé bekötött szűrő a beiktatási veszteséggel egy bizonyos rendszerzajt generál a továbbiakban, így törekedni kell minimális beiktatási veszteség megválasztására. Másik fontos paraméter a sávszélesség, amelyet 3 dB körüli értékre szoktak specifikálni. A szűrők tervezésének egyik fő szempontja, hogy éles átmenetet képezzen a szükséges (*passband*) és az elhanyagolandó (*cutoff*) frekvenciák között, mindeközben a beiktatási veszteség minimális legyen.

Az erősítő

Az erősítő a jel amplitúdójának felerősítésére szolgál, hogy az digitalizálható legyen. A szűrőkkel ellentétben ez egy olyan aktív komponens, amelynek tápellátásra van szüksége ahhoz, hogy végrehajtsa a feladatát. Az ideális erősítő csupán a szükséges jelet erősítené, azonban a valóságban zajt is erősít. Az alapvető leíró paraméterei közé tartozik egy erősítőnek a dB-ben megadott *gain* érték egy hozzá tartozó meghatározott frekvenciatartománnyal és a zajtényező, ami ugyancsak dB-ben kifejezett mennyiség.

A keverő és helyi oszcillátor

Az alapvető funkciója a keverő és helyi oszcillátor együttesének, hogy az 1575.42 MHz-es RF vivőhullámot egy alacsonyabb középfrekvenciás (*IF*) hullámmá fordítsa, megőrizve a modulált hullám struktúráját. Erre leginkább az analóg-digitál átalakító folyamat miatt van szükség, ugyanis az eredeti frekvenciatartományban nem hatékony az eljárás. A helyi oszcillátor is több komponensből épül fel. A kristályoszcillátorok önmagukban nem képesek a GNSS L1-es vivőfrekvenciát előállítani, ezért úgynevezett fáziszárt hurokba (*phase lock loop*, *PLL*) iktatják az oszcillátort, ezáltal stabil nagy frekvenciapontosságú jelet tud előállítani. Többnyire a PLL kimenete még szét is van osztva, hogy kiszolgálja az órajel generáló egységet is. Megjegyzendő, hogy ez technológiai megoldás kiváló minőséget biztosít a frekvencia-átvitelre alacsony költségek mellett.

Az analóg-digitális átalakító

A végső komponens a front-endben az analóg-digitális átalakító. Ez az eszköz felel az analóg jel digitális mintákká való átalakításáért. A fő paraméterei az ADC-nek a *bitszám*, a *maximális mintavételezési frekvencia*, az *analóg bemeneti sávszélesség* és az *analóg bemeneti skála*.

A minimális bitszám általában 8 a hagyományos ADC-k esetén. A maximális mintavételezési frekvencia a szükséges jel sávszélességéhez igazodik az előző fejezetekben tárgyalt Nyquist-Shannon mintavételi elvnek megfelelően. Megjegyezzük, hogy az aliasing effektus nem csupán a szükséges IF jel frekvenciájára vonatkozik, hanem az analóg bemeneti sávszélesség összes frekvenciaértékére. Az analóg bemeneti skála határozza meg azokat a feszültségértékeket, amelyek által a kvantálás megvalósul. Ezen folyamat során a mintavételezett impulzussorozat amplitúdó értékei meghatározott számú bit felhasználásával bináris számokká alakulnak. Ezeket az értékeket a számítógép egy bináris fájlban tárolja.

6. A GPS-méréseink feldolgozása

Méréseinket a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Központi épülete előtti parkolóban végeztük az említett NSL sztereó vevő, az antenna, egy akkumulátor és egy laptop által. A közel 50 sec hosszú mérésünk eredményeit egy 1,3 Gb méretű bináris fájlban tárolta a számítógép. Ebből is látható, hogy a rendszer nem hatékony az adatfeldolgozás és adattárolás szempontjából, óriási méretű fájlokat generál.



13. ábra: A méréshez felhasznált eszközök

A vevőkészülék gyártói szabadon fejleszthető MATLAB kódokat írtak a mérési állományok feldolgozására, így ezeket felhasználva, minimális mértékben módosítva végeztük el a feldolgozást.

Az indítóparancs megadását követően egy grafikus felület jeleníthető meg, ahol különböző paraméterek beállítása végezhető el. Ezek közül legfontosabb a mérési állomány elérési útvonalának megadása, a mintavételezési frekvencia és a spektrum középfrekvenciájának megadása, a feldolgozás időtartamának definiálása, továbbá az észlelni kívánt műholdak azonosítójának és a követéshez szükséges csatornák számának megadása.

The screenshot displays the 'Signal, processing parameters' window of a GNSS processing software. It is divided into four main sections: Signal, processing parameters; Acquisition settings; Tracking settings; and Positioning settings. At the bottom, there are buttons for 'Default', 'Apply', and 'Load current'.

Signal, processing parameters:

- Data file: D:\BMEVMS\2012-2013 N1rx_BME121031.dat
- Sampling freq. (Hz): 26000000
- N of bytes to skip: 0
- Data type: int8
- IF (Hz): 6500000
- N of ms to process: 45000
- Buttons: Select data file, Probe data

Acquisition settings:

- Satellites (PRN) to be acquired: A grid of checkboxes for PRNs 1 through 32, all of which are checked.
- Acq. band (kHz): 14
- Det. threshold: 2.5
- Button: Skip acquisition

Tracking settings:

- Number of channels: 8
- Plot tracking: ☒

PLL settings:

- Bandwidth: 25
- Damping ratio: 0.7

DLL settings:

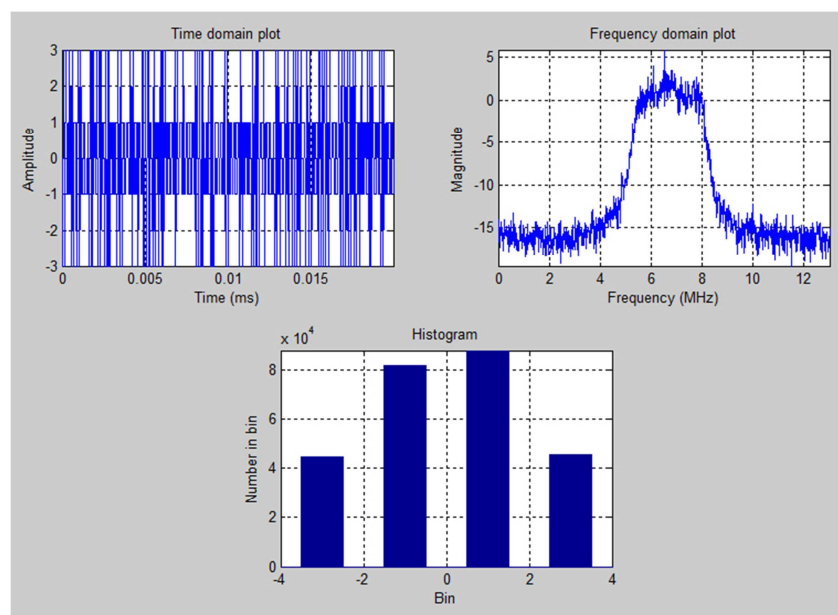
- Bandwidth: 2
- Damping ratio: 0.7
- Corr. spacing: 0.5

Positioning settings:

- Nav. sol. period (ms): 500
- Elevation mask: 10
- Troposphere correction: ☒
- True receiver coordinates (UTM):
 - E: NaN
 - N: NaN
 - U: NaN

14. ábra: A feldolgozáshoz szükséges beállítási paraméterek megadása

A paraméterek megadását követően adott a lehetőség az adatok és beállítások megfelelőségének vizsgálatára a *Probe data* parancs által. Ez esetben három darab diagramon ábrázolja a program a mérési eredményeink főbb jellemzőit egy szűk időtartományban.



15. ábra: A mérési eredmények és a beállítási paraméterek ellenőrzése

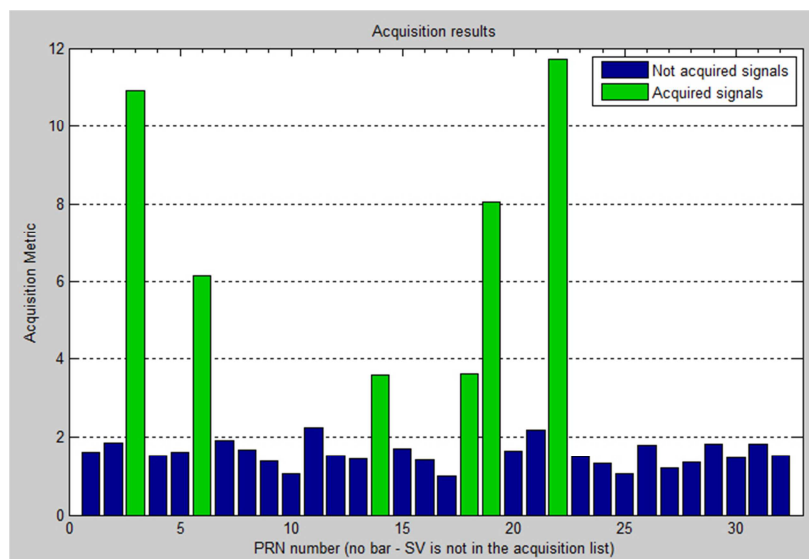
A bal felső ábrán az első 1000 mintaelem látható az időtartományban. A jel amplitúdója a digitalizálás során esetünkben négy értéket vehet fel (-3,-1, 1, 3). Ezen bináris értékek eloszlását az alsó hisztogram mutatja. Nagyobb bitszám esetén felfedezhető a hasonlatosság a haranggörbéhez, vagy Gauss-eloszláshoz, amely a termikus fehér zaj hatására enged következtetni. A felső jobb oldali ábra a frekvenciatartományban ábrázolja a jelet, amelyből kiolvasható a középfrekvencia és a megfelelő sávszélesség.

Ezt követően a *postProcessing* parancs kiadásával megkezdődik a vételezett jelünk feldolgozása, amelynek főbb lépései a műholdészlelés (*acquisition*), a jelkövetés (*tracking*) és a pozíciószámítás (*positioning*).

Műhold észlelés (*acquisition*)

Ennek a részalgoritmusnak a célja, hogy meghatározza a látható műholdakat, a vivőhullám frekvenciaértékét, valamint a kódfázis eltolását. Erre az algoritmus a már korábban ismertetett párhuzamos kódfázis keresési eljárást (lásd 8. és 9. ábra) alkalmazza.

Az eljárás lényege és hatékonysága abban rejlik, hogy az összes vizsgált frekvenciára elegendő mindössze egyetlen PRN-generált Fourier-transzformáltat és egyetlen inverz Fourier-transzformáltat előállítani műholdészlelésenként. A 9. ábrán egy észlelt műhold meghatározott frekvencia- és kódfázis értéke látható a korrelációs vizsgálat eredményeképp. A korrelációs értéket egy meghatározott értékhez viszonyítva dönti el az algoritmus, hogy észleltnek tekinti a műholdat vagy sem. Miután ezt az összes műholdra megvizsgálta egy hisztogramon tünteti fel az eredményeket:

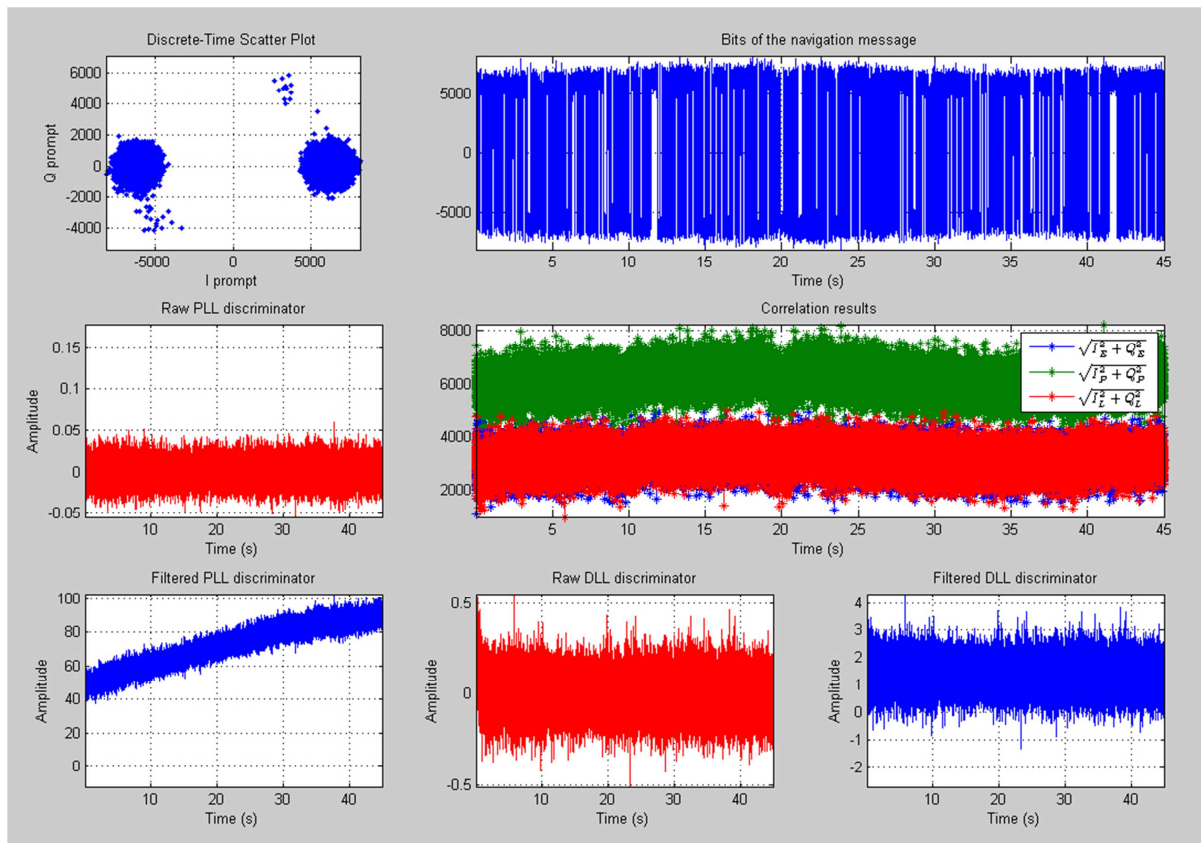


16. ábra: Az észlelt műholdak megjelenítése hisztogramon.

A jelkövetés (tracking)

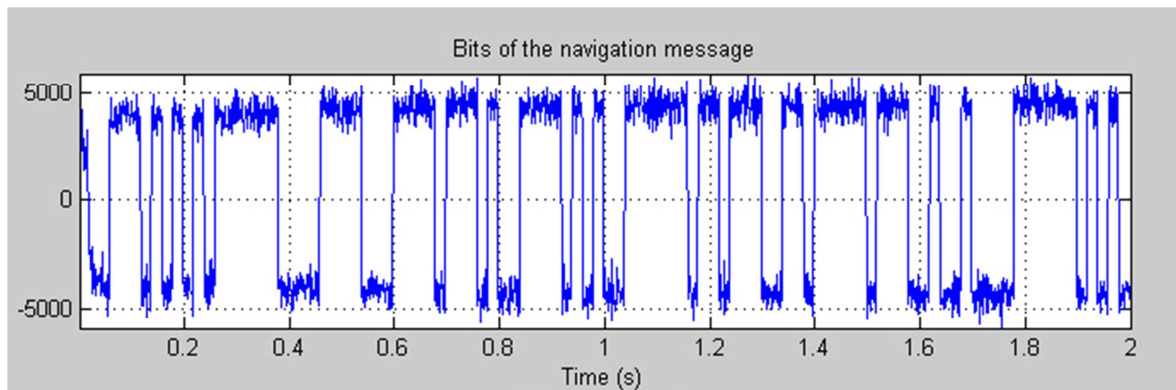
Az észlelési módszer csupán durva meghatározást jelent a frekvencia és kódfázis paraméterekre. A követési folyamat célja, hogy finomítsa ezen értékeket, folyamatosan figyelje, kövesse az észlelt jelet és demodulálja a navigációs adatokat, továbbá ezekből pszeudotávolságot határozzon meg. A demodulációhoz szükséges, hogy egzakt vivőhullám másolatot előállítsunk. Ez a már korábban említett fáziszárt hurkok (*PLL*), valamint úgynevezett *Costas-hurkok* segítségével történik.

A szoftver 8 csatornához rendeli hozzá az észlelt műholdakat és mind a nyolc csatorna folyamatosan követi az észlelt jeleket a hurkok által generált jelek (*replika*) és a folytonosan beérkező GPS jelek korrelációs vizsgálatával. A követés paramétereit grafikus ábrákon, diagramokon tekinthetjük meg:



17. ábra: A PRN 22-es műhold jelkövetésének paramétereit és a navigációs üzenet a teljes mérési intervallumban

A navigációs üzenet bitjeinek szemléltetésére egy rövidebb mérési intervallumhoz tartozó ábrát mutatunk be:



18. ábra: A navigációs üzenet bitjei a PRN 22-es műholdon 2 sec mérési idő alatt

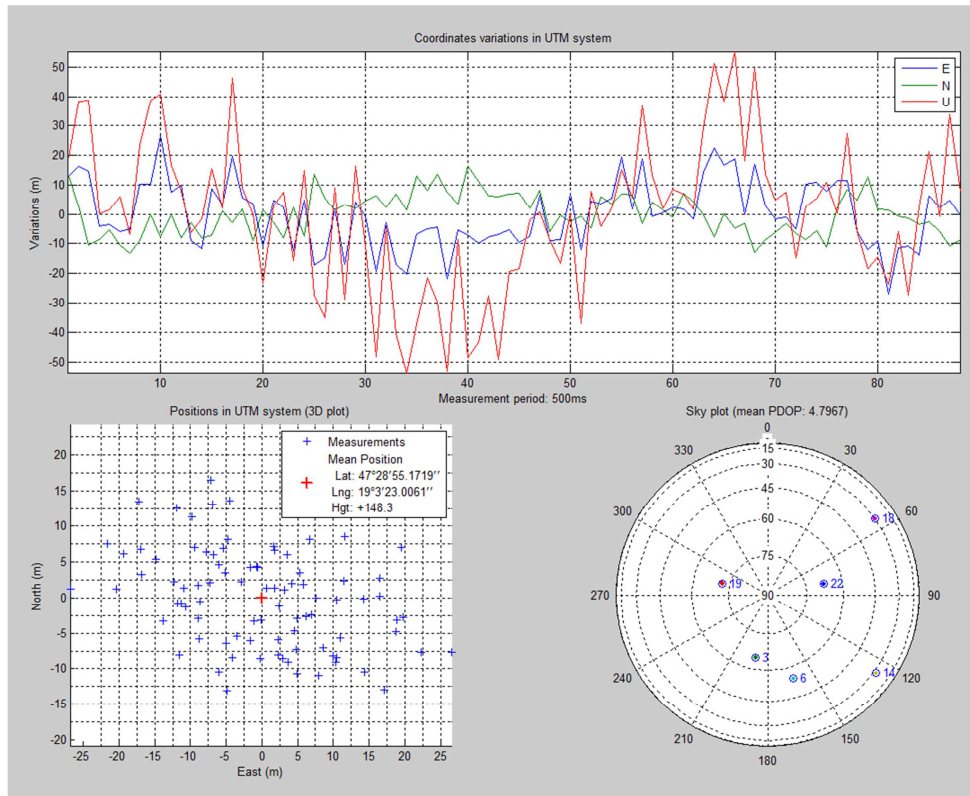
Az ábrán jól látható az üzenet -1 és +1 bitjeinek elkülönülése, amelyet egy egyszerű szűréssel le lehet választani a jelsorozatról.

Ezt követően a pszeudotávolság számítása történik a jel műhold és a vevő közti fénysebességgel történő futási idejének meghatározásából.

Pozíciószámítás (positioning)

A pozíciószámítás a klasszikus műholdas helymeghatározási számítási tételeken alapul, amelynek részleteivel jelen tanulmányban nem foglalkozunk, mivel nem képezik a jelfeldolgozás részét. A navigációs üzenetekből meghatározott műhold pozíció és a pszeudotávolságok által, megfelelő mennyiségű észlelt műhold esetén térbeli ívmetszéssel számítható a vevő pozíciója.

Az eredmények szintén grafikus felületen jelennek meg, tartalmazva a vevő pozícióját UTM rendszerben megadott földrajzi koordinátákkal, a mérés ideje alatt a koordináta összetevők relatív változásával, valamint a műhold konstellációtól függő pontosságghígulás értékek (*PDOP*) megadásával:



19. ábra: A navigációs megoldások megjelenítése

Végző lépésként a MATLAB parancssori ablakában az egyes tracking-csatornákhoz tartozó műholdak azonosítói, a jelek észlelési frekvenciája, Doppler-csúszása, kódfázis-eltérése jelennek meg táblázatos formában.

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.

>> setSettings
>> postProcessing
Starting processing...
Acquiring satellites...
(. . 03 . . 06 . . . . . 14 . . . . 18 19 . . 22 . . . . . )

+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| Channel | PRN | Frequency | Doppler | Code Offset | Status |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1 | 22 | 6.49781e+06 | -2194 | 2261 | T |
| 2 | 3 | 6.49699e+06 | -3013 | 9735 | T |
| 3 | 19 | 6.49938e+06 | -620 | 19386 | T |
| 4 | 6 | 6.49652e+06 | -3484 | 17647 | T |
| 5 | 18 | 6.49600e+06 | -4004 | 22951 | T |
| 6 | 14 | 6.50134e+06 | 1339 | 22263 | T |
| 7 | --- | --- | --- | --- | Off |
| 8 | --- | --- | --- | --- | Off |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+

Tracking started at 31-Oct-2012 19:28:20
Tracking is over (elapsed time 00:18:13)
Saving Acq & Tracking results to file "trackingResults.mat"
Calculating navigation solutions...
Processing is complete for this data block
Plotting results...
Post processing of the signal is over.
fx >>

```

20. ábra: Eredménymegjelenítés a parancssori ablakban

7. Konklúzió, kitekintés

A szoftveres GNSS vevő, alkalmazási lehetőségeit tekintve, rendkívül rugalmasnak mondható. Az óriási méretű mérési fájlok, állományok és a körülményes, utólagos adatfeldolgozás ellenére olyan lehetőségeket rejt magában, amelyek kiaknázása a piacon lévő meghatározott keretek és követelményrendszerek közé szorított hardveres vevőkkel nem lehetséges.

Elsősorban kutatási célokra alkalmas a használata, meghatározott, speciális célú vevők kiépítésére. Ilyen például a *GNSS-reflektometriában* használatos vevőkészülék. Ennek lényege, hogy egy felfelé és egy lefelé irányuló antennával egyidőben érzékelt direkt (közvetlen műholdirányú) és tereptárgyakról visszavert jelek által következtetéseket vonhatunk le a tereptárgyak mozgását, felületük minőségét, anyagát, nedvességtartalmát illetően. A folyamat végrehajtásához a GNSS jelek feldolgozásában lényeges változtatásokat kell végrehajtani a modell megvalósításához, mint például a pszeudotávolság számítása tört vonal mentén, vagy a jelek multipath-hatás miatti szűrésének megváltoztatása. Mindezen paraméterek újradefiniálása rugalmas módon jelenleg csak a szoftveres vevőkészülékek által lehetséges. Hasonló módon alkalmazzák GNSS és IMU integrált méréseinek feldolgozásakor is ezeket a vevőket. Tömegüknél és méretüknél fogva könnyen felszerelhetők akár egy robotrepülőgépre vagy egyéb platformra is.

Oktatási célokra is rendkívül alkalmas egy szoftveres GNSS vevő felhasználása, a parancssorokból, részeredményekből és grafikonokból könnyen megérhetővé válik a jelfeldolgozási folyamat.

A TDK dolgozat az említett GNSS-reflektometria témakörben írt diplomamunka előzménye, ezáltal a legfőbb célja az volt, hogy betekintést nyújtson a jelfeldolgozás főbb lépéseibe és átfogó képet mutasson a GNSS-SDR vevők működéséről.

Irodalomjegyzék

- [1] K. Borre – D. M. Akos – N. Bertelsen – P. Rinder – S. H. Jensen: A Software-Defined GPS and Galileo Receiver, Birkhäuser, Boston, 2007
- [2] T. Pany – N Falk – B. Riedl – T. Hartmann – G. Stangl – C.Stöber: Software GNSS Receiver, GPS World Magazine, September 2012
- [3] Ádám – Bányai – Borza – Busics – Kenyeres – Krauter – Takács: Műholdas helymeghatározás, Műegyetemi kiadó, 2004
- [4] Thomas Pany: Navigation Signal Processing for GNSS Software Receivers, Artech House, London, Boston, 2010