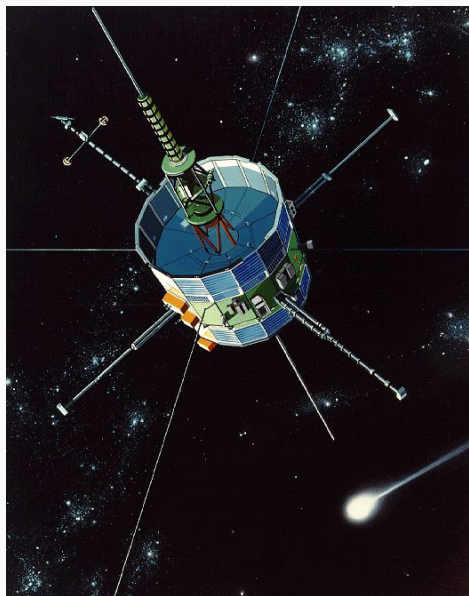


Szoftverrádiók



Előadó: Keresztes "Keri" Botond - HA5ERI
keresztes.botond@simonyi.bme.hu

ISEE-3 (International Sun-Earth Explorer-3) reboot project

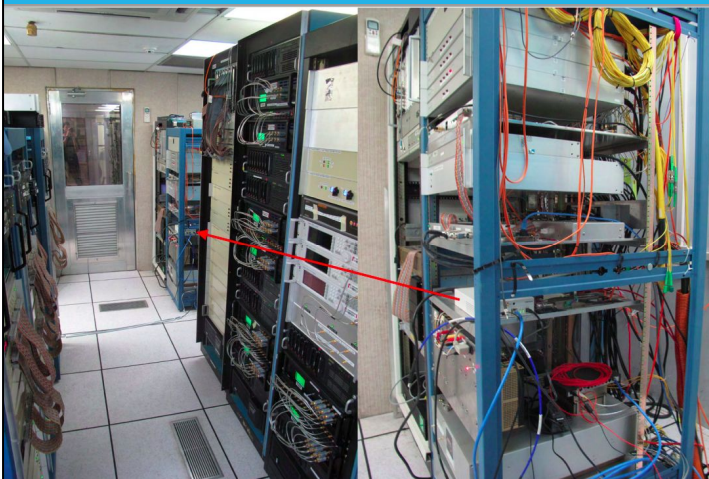


1978-ban lötték fel, a napszél és a Föld mágneses mezejének kölcsönhatást vizsgálta. '81-ben meghalt az aksi benne, azóta napelemlről ment

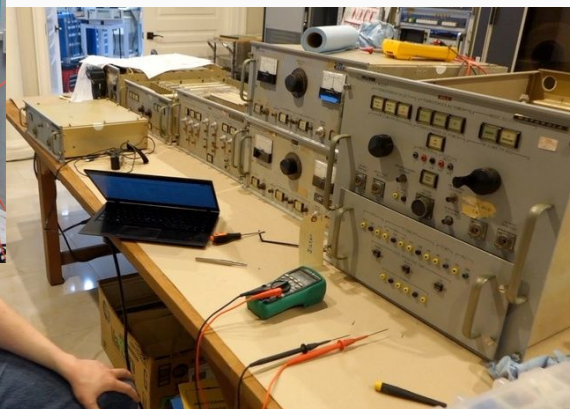
'82-ben elküldték üstökösre vadászni, International Cometary Explorer (ICE) lett, '85 és '86 találkozott üstökössel (második Halley volt), majd nap körüli pályára küldték, '91-től azt tanulmányozta, majd '97-ben takarékra kapcsolták. Néha ránéztek de nem törődtek vele, odaadták egy múzeumnak.

2014-ben újra a föld közelébe került, és civilek szerették volna újraéleszteni (a terv az volt hogy június-július környékén pont jó helyen lenne hogy kis manőverezéssel újra föld körüli pályára kerüljön), május közepén jött össze a pénz. NASA régen kidobta a cuccokat amik kellettek volna, mégpedig igen komplex rádiókat használtak, viszont átadta a dokumentációt és segített nekik - május végére már parancsokat is tudtak küldeni, és visszakapcsolták Július 2-án már a hajtóművek egy része is ment.. Sajnos a manőver nem jött össze, mert meghibásodott a hajtómű, helyette visszakapcsolták a még működő műszereket. A pályája továbbra is heliocentrikus, bár kicsit bizonytalan, legközelebb 2031-ben fog erre járni. Az utolsó összeköttetés 2014 szeptemberében volt.

ISEE-3 (International Sun-Earth Explorer-3) reboot project



Eredeti S-sávú NASA hardver



SDR "helyettesítés"

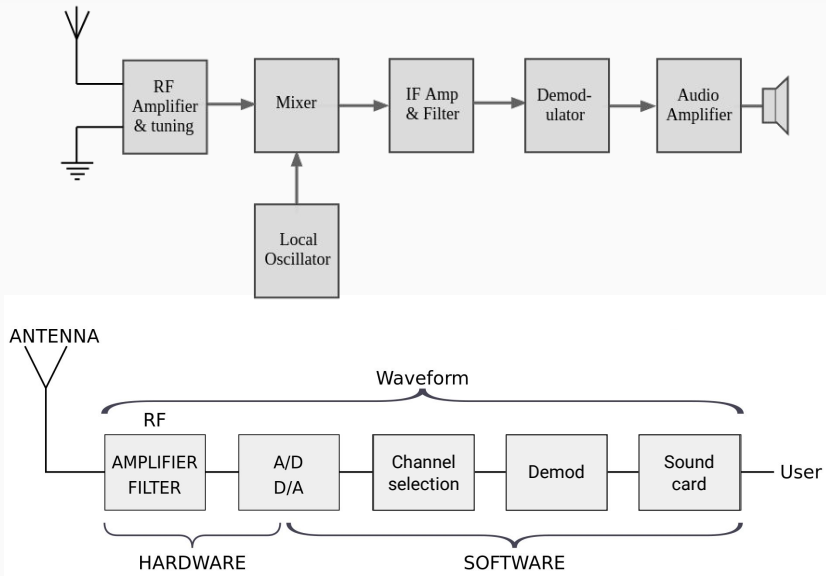
Hogy hogyan tudták ilyen gyorsan pótolni a komplex adó-vevő berendezéseket?
Természetesen szoftverrádióval!

Jobb oldalon látható a NASA (eredetileg az Apollo-programban használt) S-sávú kommunikációját lebonyolító felszerelésnek egy része. Bal oldalt pedig a kis fehér doboz a polcon (nyíllal jelezve) az ezt helyettesítő SDR.

Kép bal: http://spench.net/drupal/files/Balint_Seeber-ISEE-3_Reboot_Project.pdf

Kép jobb: <https://kemono.party/patreon/user/24896648/post/54728701>

Miből áll a szoftverrádió?



Minél többet szoftverből, csak a minimálisat HW-ben.

Mennyi a minimális hardver?

Célok és problémák

Cél: Bonyolult (de)modulációs áramkörök helyettesítése programmal
"analóg számítások elvégzése"

Legyen flexibilis: többféle modulációt (AM, FM, PM, stb) tudjon kezelni

Direkt minták előállítás/elemezése több 10/100MHz-n nem praktikus

Jelek egyértelműségi problémája (mintavételezési tétel)

A célfüggvény, hogy a (de)modulátor (adott esetben) bonyolult és nagyon specifikus áramköreit helyettesítsük egy általánosabb struktúrával, szoftverrel. Ahhoz, hogy ezt meg tudjuk tenni, a jeleket digitalizálni kell. Ez felvet kérdéseket:

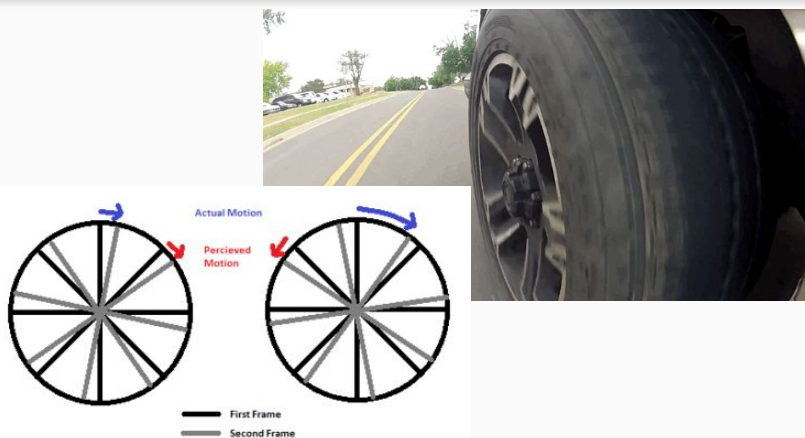
- Lehet-e (illetve milyen körülmények között lehet) egyértelmű a digitalizált jel?
- Lehet-e (célszerű-e) nagy frekvencián digitalizálni?

Egyértelműség

“Visszafelé” forgó kerék

Felvételeken néha úgy érzékeljük, hogy a kerék visszafelé forog, miközben a kocsi előre halad.

Miért?

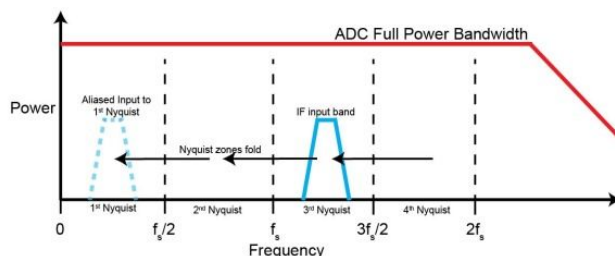
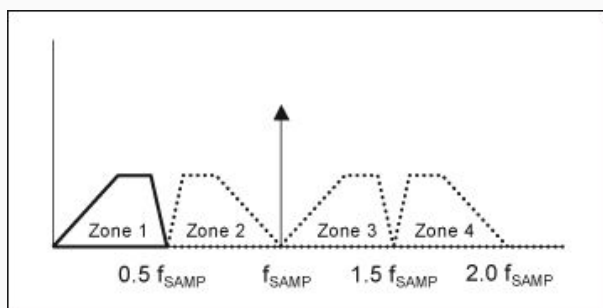


Valószínűleg mindenki látott már felvételen autókereket “visszafelé” forogni. Ez is a mintavételezésnek az egyértelműségi problémájához köthető. Közismert, hogy a kamerák több állóképből alkotnak mozgóképet, így ha a kerék kellően gyorsan forog, mondjuk két rögzítés között 350 fokot fordul óramutató járással ellentétesen, akkor mi azt úgy is észlelhetjük (és általában úgy észleljük) mintha 10 fokot fordulna óramutató járásával megegyezően.

https://www.youtube.com/watch?v=BFeUb1mnKyQ&ab_channel=ChanceYoung

Shannon-Nyquist mintavételi tétel

Tétel: Ha egy jel sávszélessége B^* , akkor abból legalább $1/2B$ időközönként kell mintát venni az egyértelműséghez.



Ezt az egyértelműségi problémát magyarázza a Shannon-Nyquist (ejtsd: Nükviszt) tétel. Mintavételezéskor a (mintavételi frekvenciához képest) nagyobb frekvenciájú jelek “belapolódnak” az 1. Nyquist zónába, így “egymásra pakolódnak”. Viszont amennyiben tudjuk biztosítani, hogy a mintavételezett jelünk egy Nyquist zónán belül legyen, úgy egyértelműen meg tudjuk mondani mi volt az eredeti jelünk.

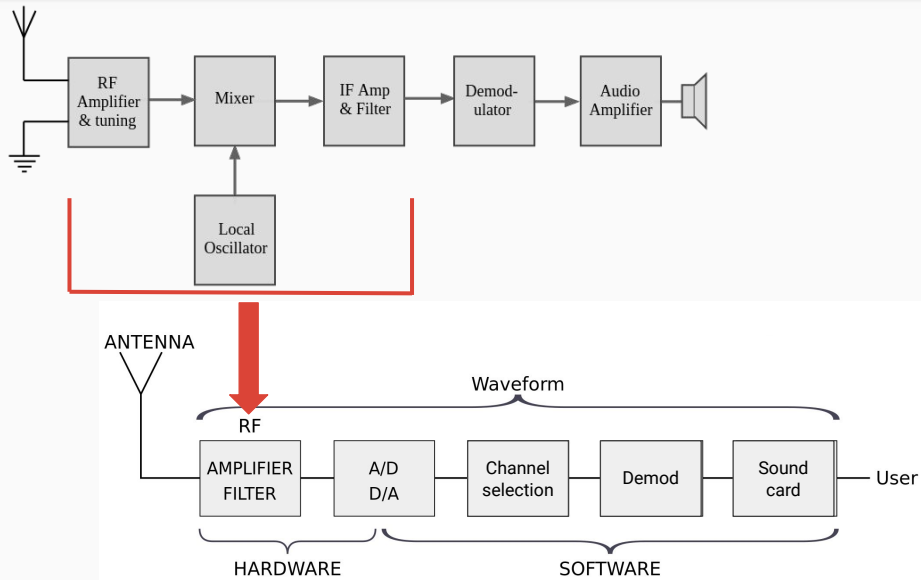
Ha a jelünket mintavételkor nem az 1. hanem valamelyik nagyobb számú zónába helyezük, akkor azt alulmintavételezésnek hívjuk, és úgy működik, mintha egy keverő lenne.

Kép bal: <https://www.analog.com/en/design-notes/foldedfrequency-calculator.html>

Kép jobb:

<https://www.epdtonthenet.net/article/117749/Bandwidth-is-king-in-aerospace-and-defense-applications.aspx>

Egyértelműség biztosítása



Hogyan biztosítjuk az egyértelműséget? Pl. szuperheterodin vevővel:

- KF szűrő nem lehet szélesebb mint a Nyquist zónánk, illetve a szupervevő kimeneti spektruma nem lóghat ki a választott Nyquist zónából!
- Lekeverünk alacsonyabb frekvenciákra, így "kényelmesebben" tudunk mintavételezni. A gyakorlatban az A/D konverter analóg sáv szélessége is számít, nem csak a mintavételi frekvencia!

Matek és modulációk emlékeztető

$$A \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t) \Rightarrow \frac{1}{2} A$$

$$A \cos(\omega t) \cdot \sin(\omega t) \Rightarrow 0$$

$$A \cos(\omega t) \cdot \cos(\omega t) \Rightarrow \frac{1}{2} A$$

$$A \sin(\omega t) \cdot \cos(\omega t) \Rightarrow 0$$

$$A(t) \cdot \sin[\omega t + \phi(t)]$$



$$A(t) \cdot \sin(\omega t) \cos[\phi(t)] + A(t) \cdot \cos(\omega t) \sin[\phi(t)]$$

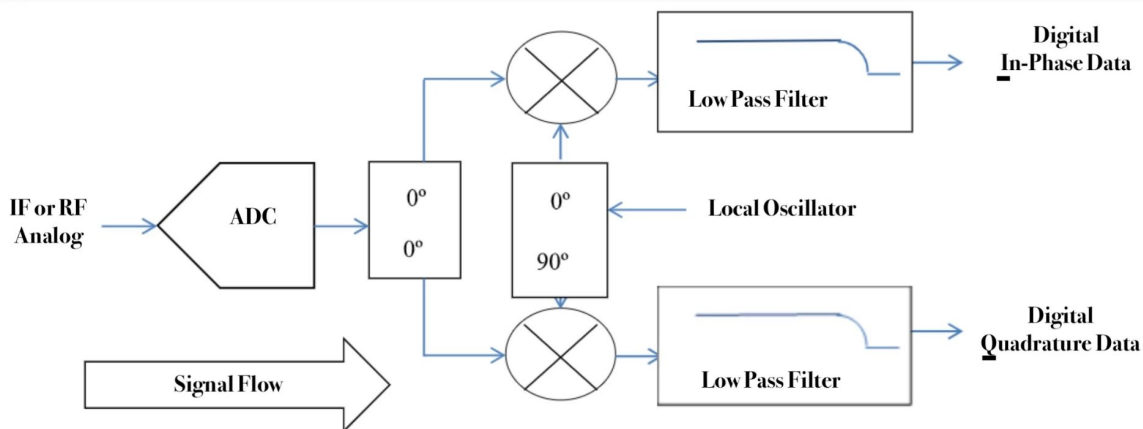
Fázis

Kvadratúra

Emlékeztető: A szinusz és koszinusz függvény egymásra ortogonális (független), mert a (skaláris) szorzatuk nulla. Ezáltal ha a vevőnél két helyi oszcillátorral keverünk melyek pont 90 fokos tolásban vannak egymáshoz képest, akkor a jelünket komplex fazorként tudjuk értelmezni (amplitúdó + fázis információ).

Bővebben lásd: 1. előadás (Matematika és modulációk)

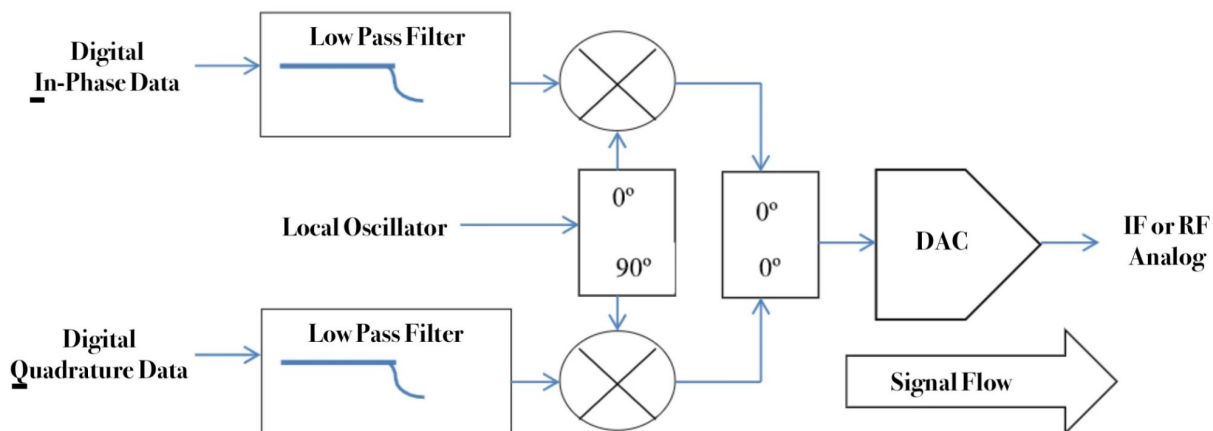
IQ demodulátor



Már az I és Q ágakat is meg lehet valósítani digitálisan. Mintavételezés után a digitalizált adatsort külön egy szinusszal illetve koszinusszal szorozva előállítható az I és Q jel.

Ilyenkor egy B sávszélességű jel esetén elég az A/D konvertert B mintavételi frekvenciával járatni. Ez elsőre látszólag megsérti a mintavételi tételt, mely azt mondja, hogy ilyenkor $2B$ frekvenciával kell mintavételezni. Annak a pontos magyarázata, hogy miért nem ez a helyzet, túlmutat ezen tanfolyam anyagán. A kicsit pongyola, de talán szemléletesebb magyarázat az, hogy ha csak B frekvenciával mintavételezünk, de utána ebből a jelből előállítunk két egymástól (matematikai értelemben) független jelet a kvadratúra keverő által, így ugyanannyi független mintához jutunk, mintha eleve $2B$ frekvenciával mintavételeztünk volna. Ezáltal ugyanannyi információnk van a jelről, és nem sérült a mintavételi tétel.

IQ modulátor



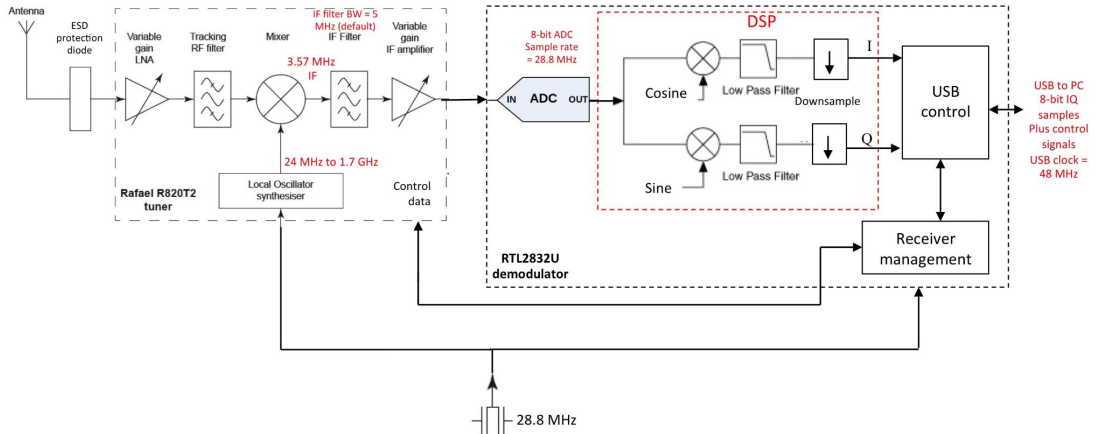
Az előző dián tárgyaltak “fordítva” is igazak, ugyanezen megfontolások alapján összerakható egy IQ modulátor is.

Ez és az előző dián lévő képek forrása:

<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/should-i-and-q-combining-and-separation-be-done-digitally-or-analogly/>

RTL-SDR blokk diagram

Simplified Block Diagram of NooElec RTL-SDR

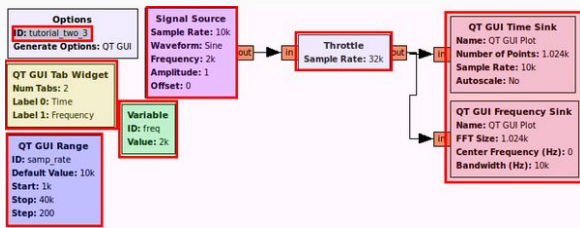


Amit az előbb láthattunk elméletben, az gyakorlatban így néz ki, az ábrán egy RTL-SDR szoftverrádió blokk diagramja látható. Jól elkülönül benne az RF blokk (szuperheterodin vevő) a kvadratúra oszcillátor (itt az egy A/D konverteres megoldással) és végül de nem utolsó sorban a számítógép felé kapcsolatot létesítő egység, ez esetben USB.

Érdeemes megjegyezni, hogy az a módszer is működik, hogy az I és Q jelet analóg módon állítjuk elő, és külön digitalizáljuk az I és Q ágakat. Pl. a HackRFOne az utóbbi megoldást használja.

Forrás: https://aaronsher.com/wireless_com_SDR/rtl_sdr_info.html

Mitől megy? - Pl. GNU rádió



- Blokk alapú jelfeldolgozó könyvtárak
- Széleskörűen konfigurálható blokkok
- Köztük a jeltovábbítás megoldott
- Pythonban, C++-ban programozható
- GNU Radio Companion: egyszerű GUI

A GNU rádió programmal blokkvázlat szerűen lehet összerakni jelfeldolgozási láncokat. Az egyes modulok C++ nyelven vannak megírva, így a merészebbek akár saját blokkokat is létrehozhatnak maguknak. <https://www.gnuradio.org/>

Más grafikus felülettel rendelkező szoftverrádiós programok pl. a GQRX vagy az SDR# (alapvetően vízésés diagramokon rajzolják ki a spektrumot, illetve “egyszerűbb” demodulátorok implementálva vannak.

<https://gqrx.dk/>

<https://www.rtl-sdr.com/tag/sdrsharp/>

Mitől megy? - Pl. C kód

```
1. #include <math.h>
2. #include <stdio.h>
3.
4. int main()
5. {
6.     double i, q, s;
7.     for(;;) //végtelen ciklus
8.     {
9.         i=((unsigned char)getchar()-127); //beolvasás
10.        q=((unsigned char)getchar()-127); //interlaced I, Q
11.        s=sqrt(i*i+q*q); //pillanatnyi amplitudó
12.        putchar((unsigned char)(s+127)); //kiírás
13.    }
14. }
```

A mintákat persze mi is feldolgozhatjuk a saját C-ben (vagy egyéb programozási nyelven) írt kóddal.

A dián a klasszikus detektoros vevő implementációja látható.

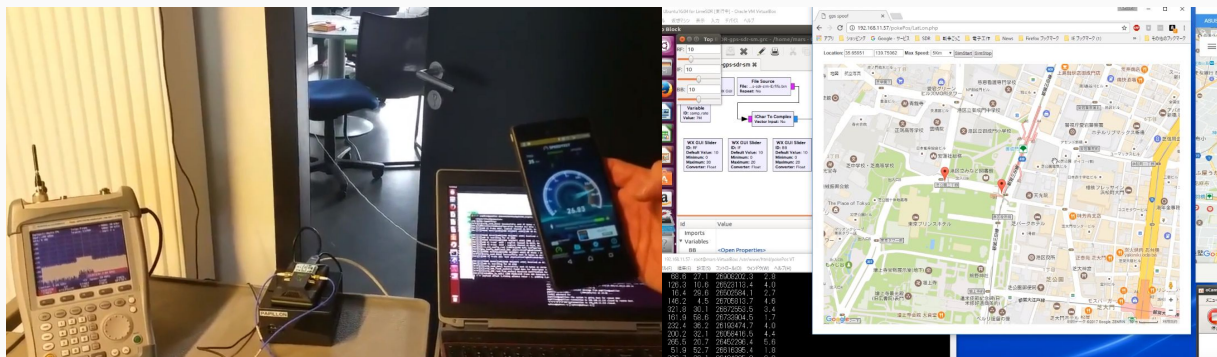
Hasonló feladat vár majd a hallgatóságra az SDR gyakorlat alkalmával.

Mire használható?

GSM / 4G bázisállomás

GPS adó

..és még sok más

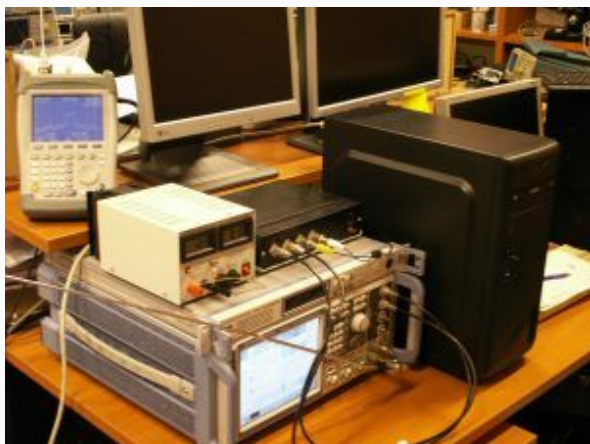


Mire nem?

Ha még nem említettük elégszer: IQ modulációval olyan jeleket/modulációkat állítunk elő, amelyeket csak szeretnénk, pl. eljátszhatjuk, hogy mobil bázisállomás vagy GPS műhold vagyunk. Talán nem kell említeni, de ez engedély nélkül természetesen illegális.

De nem csak diákcsínyekre jó: Mivel mindenféle moduláció előállítható ezzel a módszerrel így pl. mobilhálózatok fejlesztésében, új protokollok kidolgozásában is elterjedten használják.

Mire használható?



DRM tesztadás

- Digitális rádió
- RH hullámterjedési kísérlet
- Szomel Kft. vezetésével
- BME közreműködésével
- Alapsáv: Hangkártya
- RF sáv: Vektor modulátorral

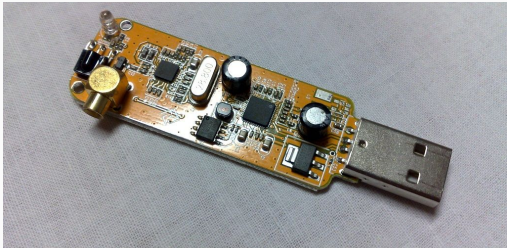
Egy az egyetemhez (és a klubhoz) szorosabban kapcsolódó példa a 2020 és 2021-ben zajlott DRM kísérleti adások, melyek a Szomel Kft. vezetésével zajlottak. Az ügyvezető Szombathy Csaba a klub közeli barátjának mondható, így a kísérletben több jelenlegi és volt klubtag is részt vett, különböző formákban: Krüpl Zsolt - HG2ECZ; Kiss Ádám - HA8KDA; Keresztes Botond - HA5ERI

A tesztadó eredetileg egy számítógép hangkártyájából egy alapsávi erősítőből, egy vektor modulátorból (IQ modulátor) és egy RF erősítőből állt.

<https://www.vik.bme.hu/hir/2705-kiserleti-digitalis-radioadas-vik-kozremukodessele>

<https://www.drm.org/hungary-re-launches-drm-shortwave-transmissions-in-budapest/>

Piacon lévő eszközök



- DVB-T vevők pl. RTL-SDR (Realtek RTL2832U)
- HackRF
- LimeSDR
- NI USRP
- Red Pitaya

A kereskedelemben a szoftverrádiók egyre szélesebb palettája kapható (feltéve ha éppen van IC, hogy gyártsák). Ezek lehetnek egyszerű IQ jeleket előállító és azokat a számítógépnek továbbküldő eszközök (pl. RTL-SDR), de kaphatók integrált FPGA-val gyártott eszközök is (pl. Red Pitaya), ha valaki jobban bele szeretné vetni magát a digitális jelfeldolgozásba.

CHOOSE A GENUINE RTL-SDR BLOG V3

FULL 2 YEAR WARRANTY AGAINST MANUFACTURING FAULTS
EMAIL & FORUM SUPPORT
SUPPORTS THE BLOG FOR NEW CONTENT, TUTORIALS AND PRODUCTS!

GENUINE GUARANTEE:
BE WARAY OF INFERIOR
RTL-SDR BLOG V3 COUNTERFEITS!

RTL-SDR BLOG

RTL-SDR sztoriját érdemes említeni:

DVB-T (földfelszíni TV adás) vételre gyártottak rádióvevőt ami számítógépbe dugva veszi a TV adást. Az eszközön belül szoftverrádió volt, amit célhardver dekódolt, és a képet küldte a gépre. Később kiadtak egy programfrissítést amivel FM adást lehetett venni - mint kiderült ez úgy működött hogy debug módba kapcsolt az IC, és az elküldte a nyers IQ mintákat - ezzel a módszerrel (+ a tuner IC feletti irányítás átvételével, ami szintén innen jött) bármilyen más adást is lehetett demodulálni - ami azt illeti az eredeti áramkört már áttervezték TV sávra szélessávú vevőre.

Piacon lévő eszközök

| | HackRFOne | USRP B200 | Lime SDR | RTL-SDR v3 |
|------------------------|-------------------|----------------|-------------------|---------------------|
| Frekvencia | 1 MHz - 6 GHz | 70 MHz - 6 GHz | 100 kHz - 3,8 GHz | 500 kHz - 1,766 GHz |
| Sávszélesség | 20 MHz | 56 MHz | 61,44 MHz | 3,2 MHz |
| Mintavétel | 20 Msps | 56 Msps | 61,44 Msps | 3,2 Msps |
| Felbontás | 8 bit | 12 bit | 12 bit | 8 bit |
| Adóteljesítmény | - 10 dBm - 15 dBm | 6 dBm - 16 dBm | - 6 dBm - 15 dBm | N/A |
| Ár | ~ \$380 | ~ \$1100 | ~ \$580 | ~ \$33 |

Összehasonlítás a piacon lévő népszerűbb SDR-ek főbb műszaki paramétereiről.

Az árak 2023 márciusában lettek aktualizálva az [amazon.com](https://www.amazon.com)-ról.

Források:

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_software-defined_radios

<https://hackrf.readthedocs.io/en/latest/faq.html>

<https://sites.google.com/ncsu.edu/aerpaw-wiki/aerpaw-user-manual/5-future-platform-features/5-8-sdr-misc/usrp-and-sdr-computer-configuration-and-power-limits>

<http://www.dd1us.de/Downloads/LimeSDR%20mini%20TX%20output%20power%20in%20the%20VHF-UHF-SHF%20bands%20rev1.pdf>



Akkor a szoftverrádió volna a rádiózás alfája és omegája és a jövő teljesen digitális? Azért nem egészen. Kétségtelen, hogy rengeteg előnye van, főleg akkor, ha komplex modulációkat kell előállítani, demodulálni. Ám ugyanakkor azt is láttuk, hogy ahhoz hogy működjön ez a struktúra elengedhetetlen, hogy legyen a be- illetve kimeneten egy jól felépített analóg szekció, mely meg fogja határozni a rádió fő RF paramétereit (érzékenység, dinamika, stb.). Egyszerűbb modulációk, (pl. AM vagy FM) esetén pedig akár bonyolultabb is IQ (de)modulátorokat építeni, mintha megcsinálnánk analóg alkatrészekből. De a legnagyobb hátrány amiről eddig nem esett szó az a jelfeldolgozási késleltetés. Mivel nem célirányos hanem általános célú hardvert használunk a jelfeldolgozásra, annak jelentős késleltetése lehet az analóg megfelelőjéhez képest.

A konklúzió talán az, hogy a szoftverrádió egy jelentős előrelépés a rádiós technológiában, de a szoftver nem tudja kiváltani a működéséhez szükséges kiegészítő analóg technikát, avagy az eddigi módszereket kiegészíti és nem felváltja.

Véget ért a móka mára Zár a Kafu mókatára

Kérdések?

A diasort átdolgozták:

2022 ősz: Baráth "Dínóbácsi" László - HA7DN

2023 tavasz: Keresztes "Keri" Botond - HA5ERI