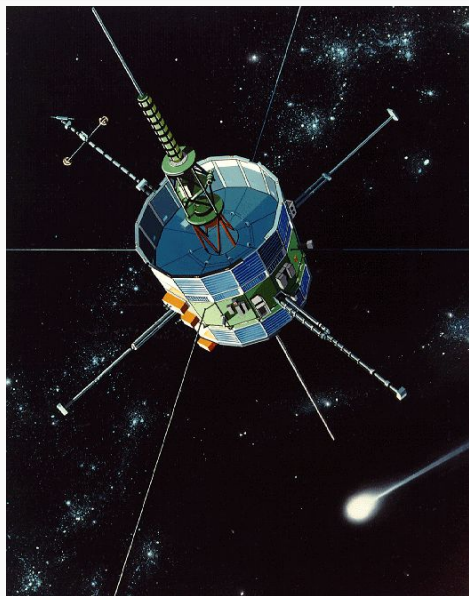


Szoftverrádiók



Előadó: Párkányi László - HA5PLS
parkanyi.laszlo@simonyi.bme.hu

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

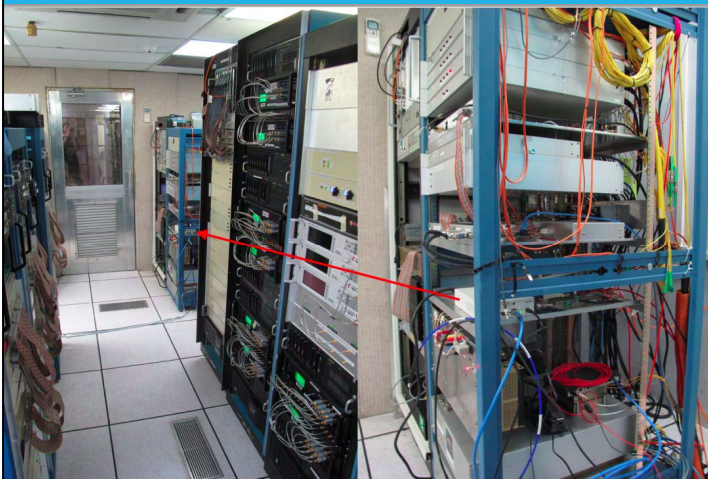


1978-ban lötték fel, a napszél és a Föld mágneses mezejének kölcsönhatást vizsgálta. '81-ben meghalt az aksi benne, azóta napelemlről ment

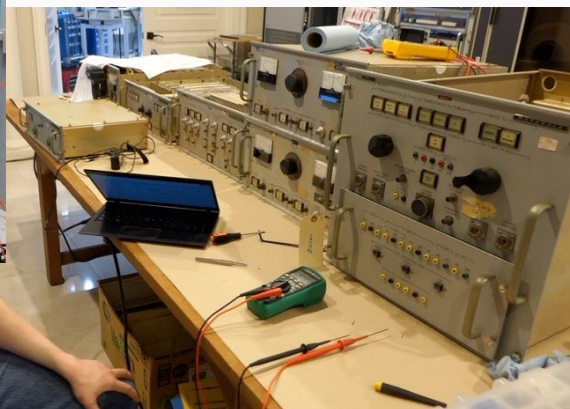
'82-ben elküldték üstökösre vadászni, International Cometary Explorer (ICE) lett, '85 és '86 találkozott üstökössel (második Halley volt), majd nap körüli pályára küldték, '91-től azt tanulmányozta, majd '97-ben takarékra kapcsolták. Néha ránéztek de nem törődtek vele, odaadták egy múzeumnak.

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"

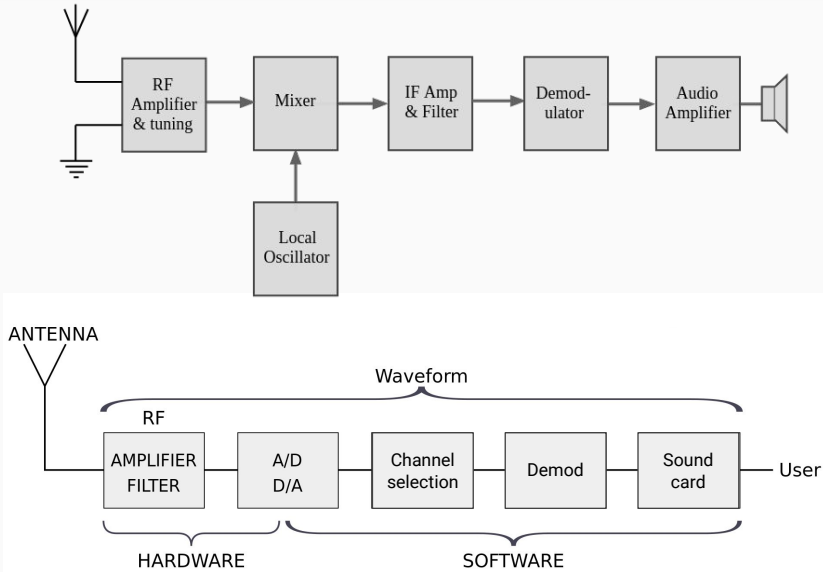
Hogy hogyan tudták ilyen gyorsan pótolni a komplex adó-vevő berendezéseket?
Természetesen szoftverrádióval!

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. De mennyi a minimális hardver? Mintavételezésre mindenképpen szükségünk van, az egy analóg építőelem. Az RF jel kondicionálására (szűrés, előerősítés, esetleg csillapítás) szintén analóg áramkörökre van szükségünk, mert az ADC-k elég "válogatós állatok", könnyen túlvezérelhetőek, és onnantól jön a szivárgás, átlapolódás, és a többi nemkívánatos nemlineáris jelenség. Illetve egyelőre a nagyon nagy frekvenciás AD/DA átalakítók sokkal drágábbak, mint egy hasonló frekvencián működő keverő fokozat, akár több tíz MHz sáv szélességgel, széles tartományban, így a legtöbb eszköz tartalmaz (legalább egy) analóg keverést is.

Célok és problémák

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

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

Direkt minták előállítás/elemezése több GHz-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:

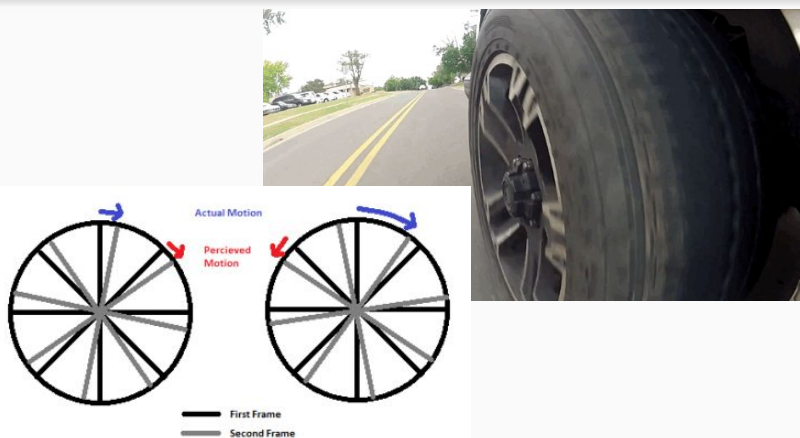
- Lehet-e (illetve milyen körülmények között lehet) egyértelmű a digitalizált jel? Mindjárt kiderül!
- Lehet-e (célszerű-e) nagy frekvencián digitalizálni? Nyilván nem, mert nagyon drága, valamint nem is reális ilyen sebességgel feldolgozni az adatokat. Tegyük fel, hogy egy 1GHz-es ADC jelét akarjuk feldolgozni (ehhez 8 bites mintákat feltételezve durván 10Gb/s átviteli sávszélesség kell már önmagában...), akkor az átlagosan 4-6 GHz-en üzemelő processzorunknak 4-6 ciklus alatt kellene előállítania a kimenetet. Persze lehet több magot használni, 8 szál esetén megnövelhető a rendelkezésre álló órajel száma 24..48-ra, ami figyelembe véve, hogy egy utasítás nem egy órajel-ciklus alatt zajlik le, és más folyamatoknak is szükségük van arra a processzorra (például az oprendszernek, azt semmi esetre sem lehet kihagyni), és még mindig édeskevés időnk van feldolgozni valós időben. Így látható, hogy érdemes (közel) a lehető legalacsonyabb mintavételi frekvenciát használni. De mivel nagyon kevés alkalmazás kíván ekkora sávszélességet, ez nem is jelent nekünk problémát.

Egyértelműség

“Visszafelé” forgó kerék

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

Miért?

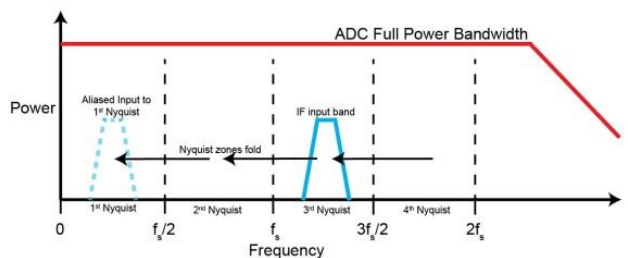
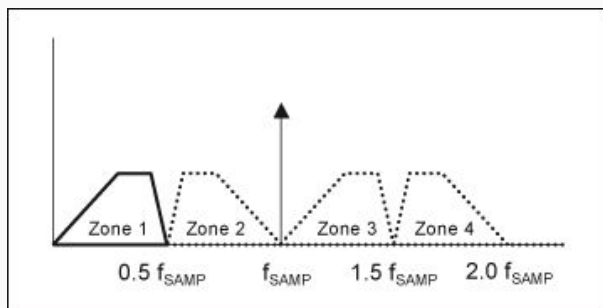


Valószínűleg mindenki látott már felvételen autókereket “visszafelé” forogni. Ez is a mintavételezésnek az egyértelműségi problémájához köthető. Közismert, hogy a kamerák több állóképből alkotnak mozgóképet, így ha a kerék kellően gyorsan forog, mondjuk két rögzítés között 350 fokot fordul óramutató 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.

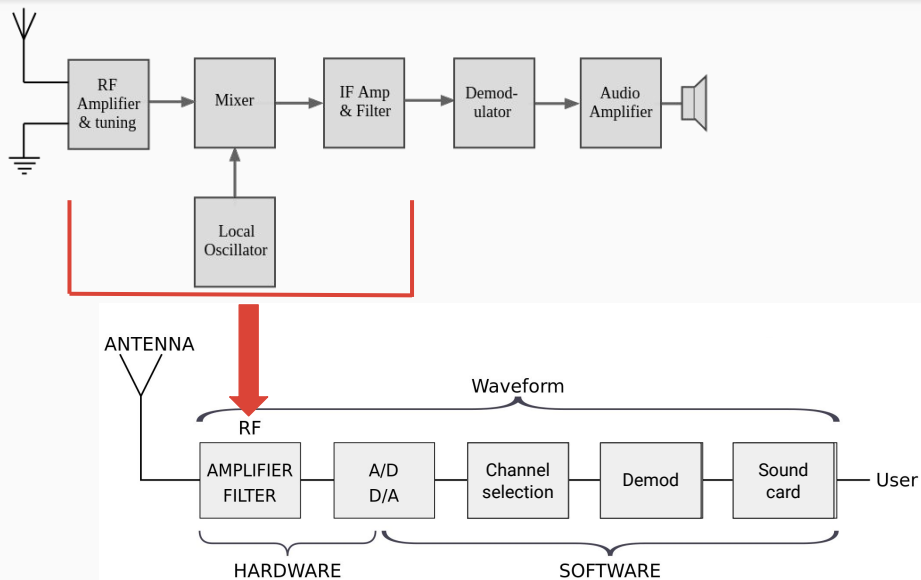
Ha a jelünket mintavételkor nem az 1. hanem valamelyik nagyobb számú zónába helyezük, akkor azt alulmintavételezésnek hívjuk, és úgy működik, mintha egy keverő lenne.

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

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

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

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

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

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



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

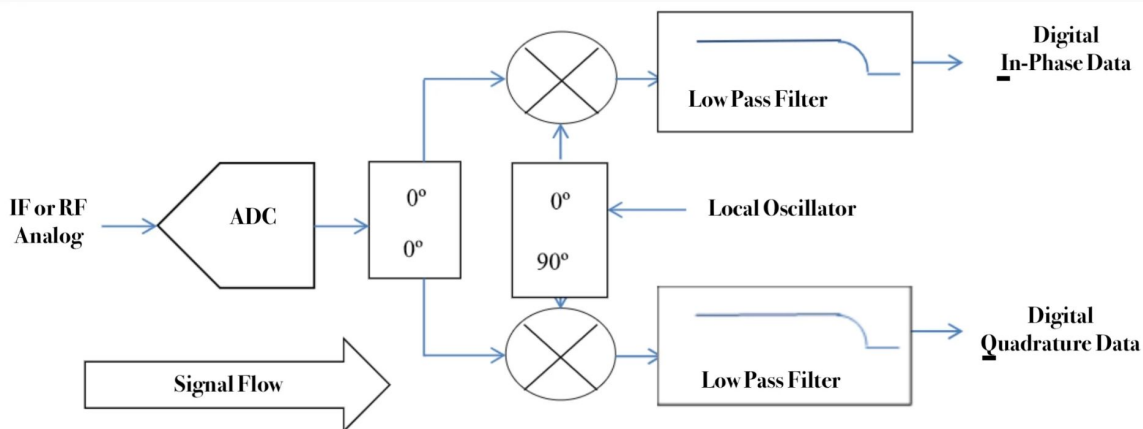
Fázis

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

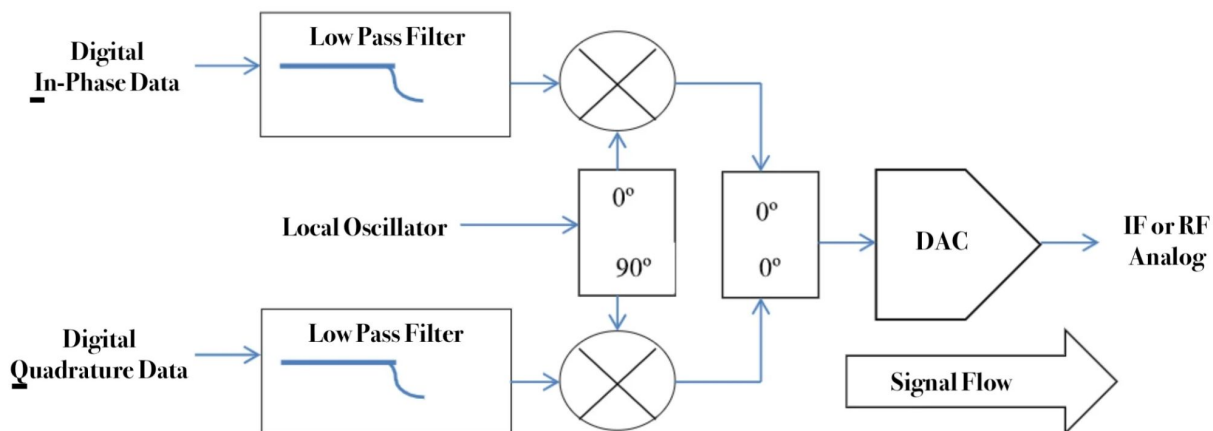


Már az I és Q ágakat is meg lehet valósítani digitálisan. Mintavételezés után a digitalizált adatsort külön egy szinusszal illetve koszinusszal szorozva előállítható az I és Q jel.

Ilyenkor egy B sávszélességű jel esetén elég a rendszer nagy részét B mintavételi frekvenciával (vagy alacsonyabban) járni. A mintavételezésnek és a keverésnek továbbra is $2B$ frekvencián kell történnie, mert különben sérülne a mintavételi tétel. A komplex keverés után viszont megengedhető a mintavételi frekvencia megfelezése, mivel a két ág (I és Q) ortogonálisak egymásra, azaz függetlenek. És mivel (az újonnan előállított) komplex jelnek nem feltétlenül szimmetrikus a spektruma a 0 frekvenciára, nem történik átlapolódás.

Amennyiben viszont két ADC-vel mintavételezünk egy analógan IQ-kevert jelet, a mintavételezés B frekvenciájának megfelelő sávszélességű jel is visszaállítható, a már említett ortogonalitás révén.

IQ modulátor



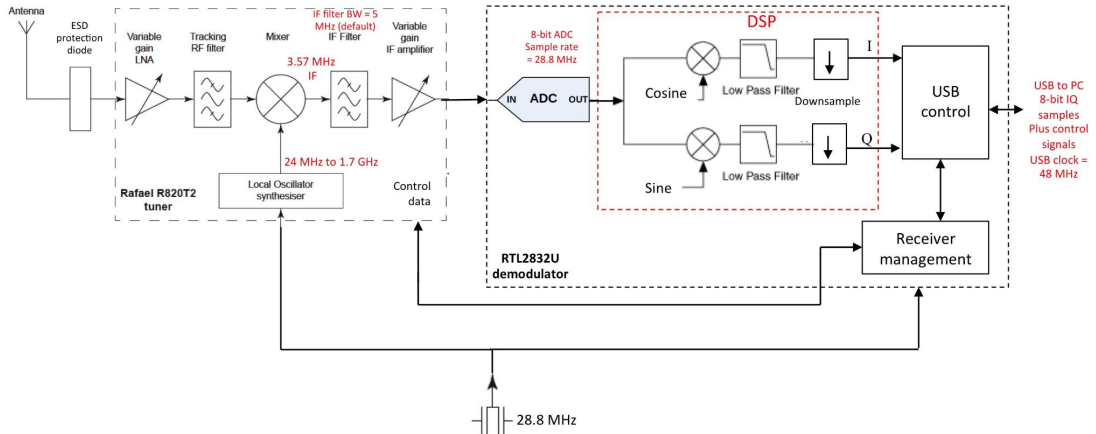
Az előző dián tárgyaltak “fordítva” is igazak, ugyanezen megfontolások alapján összerakható egy IQ modulátor is.

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/>

Gyakorlatban: RTL-SDR blokk diagram

Simplified Block Diagram of NooElec RTL-SDR

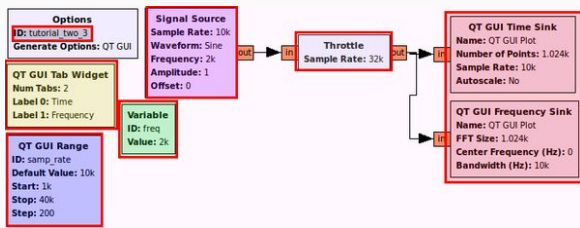


Amit az előbb láthattunk elméletben, az gyakorlatban így néz ki, az ábrán egy RTL-SDR szoftverrádió blokk diagramja látható. Jól elkülönül benne az RF blokk (szuperheterodin vevő) a kvadratúra oszcillátor (itt az egy A/D konverteres megoldással) és végül de nem utolsó sorban a számítógép felé kapcsolatot 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. A digitális IQ keverés olcsóbb, mert csak egy ADC kell, de megfelel a sávszélességnek.

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

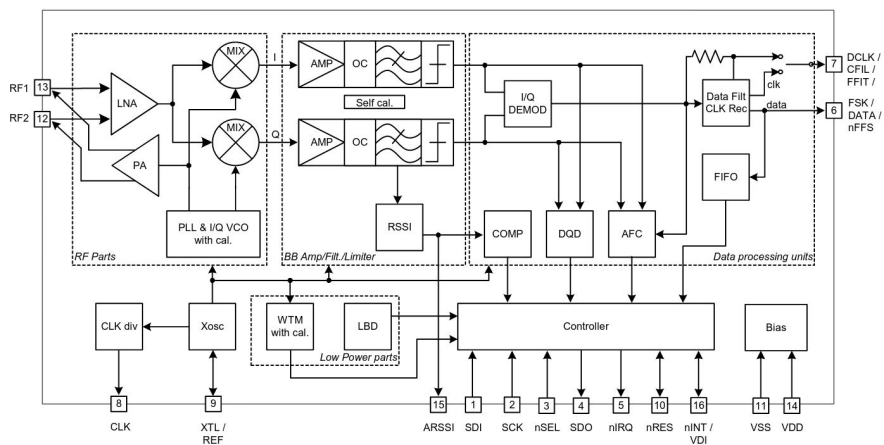
```
1. #include <math.h>
2. #include <stdio.h>
3.
4. int main()
5. {
6.     double i, q, s;
7.     for(;;) //végtelen ciklus
8.     {
9.         i=((unsigned char)getchar()-127); //beolvasás
10.        q=((unsigned char)getchar()-127); //interlaced I, Q
11.        s=sqrt(i*i+q*q); //pillanatnyi amplitudó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

Hasonló feladat vár majd a hallgatóságra az SDR gyakorlat alkalmával.

Mitől megy? - PI. ASIC



A képen látható a Silicon Labs Si4432 integrált áramkörének blokkvázlata. Nem kell megérteni mi mit csinál rajta, ami most érdekes, hogy bal felül látható két keverő rajza, mellette I és Q feliratokkal: ez a kompakt eszköz is szoftverrádióval megy. A demodulátor része többféle digitális modulációra képes, úgy mint OOK, FSK, (G)MSK, ráadásul állítható frekvencián és adatátviteli sebességgel.

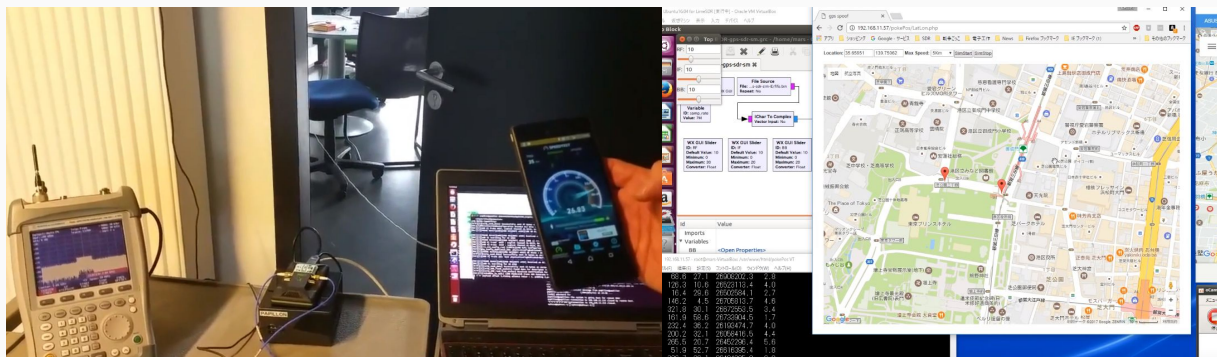
Nyilván nem olyan rugalmas, mint egy RTL-SDR, de filléres tétel, alig fogyaszt valamit, és nagyon egyszerűen integrálható egy dizájnba.

Mire használható?

GSM / 4G bázisállomás

GPS adó

..és még sok más

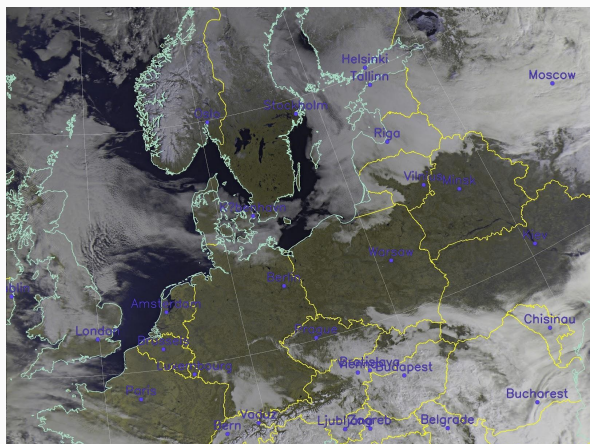


Mire nem?

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, olyan is, amit analógan csak lehetetlenül bonyolult áramkörökkel lehetne (a digitális modulációk túlnyomó része) de előszeretettel használják kísérletezésre, prototipizálásra pl. mobilhálózatok fejlesztésében, új protokollok kidolgozásában vagy egyedi, speciális protokollok megvalósítására (pl. műholdas kommunikáció, katonai alkalmazások) illetve a modern radartechnikában is.

Mire használható?



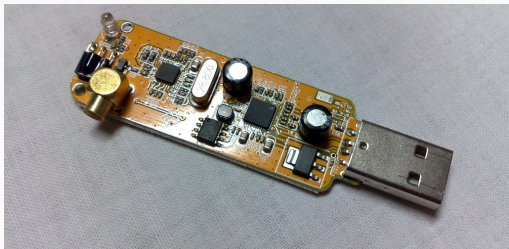
Noaa és Meteor műholdvételel

- Antenna + analóg előerősítő
- RTL-SDR + raspberry pi 1
- Vevő: Kunhegyesen
- Feldolgozás: Budapesten
- Digitális- és analóg moduláció

A klub mostanában lezáruló projektje a noaa és meteor műholdak vétele. A vételben problémát jelentett a Schönherz tetőn lévő számos zavaró jel - de mivel szoftverrádiónál nincs összenőve a vevő és a demodulátor, a vételt (antenna, előerősítő, rtl-sdr, raspberry pi) leküldtük Kunhegyesre egy volt klubtaghoz, míg a képek demodulálását és a megjelenítést végző weblap kiszolgálását a klub szervere végzi a 19. szinti klubszobában. A szoftverrádiók rugalmasságát jól mutatja, hogy a Noaa- és az azonos frekvenciasávban üzemelő, de teljesen más modulációt használó Meteor műholdakat ugyan azzal a lánccal vesszük. Ezen kívül a pár hete fellőtt Meteor M2_4 műholdat egy frissítés után minden gond nélkül vette a rendszerünk.

Az általunk vett képek elérhetőek az alábbi linken: <https://noaa.ha5kfu.hu/>

Piacon lévő eszközök



- DVB-T vevők pl. RTL-SDR (Realtek RTL2832U)
- HackRF
- LimeSDR
- NI USRP
- Red Pitaya
- FL2000 - USB-VGA kártya (csak adó)

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.

Amiben DAC vagy ADC van, abból készülhet szoftverrádió - és készül is, ennek ékes példája a FrescoLogic FL2000-es USB-VGA adaptere, ami egy illesztőprogram csere után lehet FM adó vagy GSM cella is.

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>

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.



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

2024 tavasz: Párkányi László - HA5PLS