

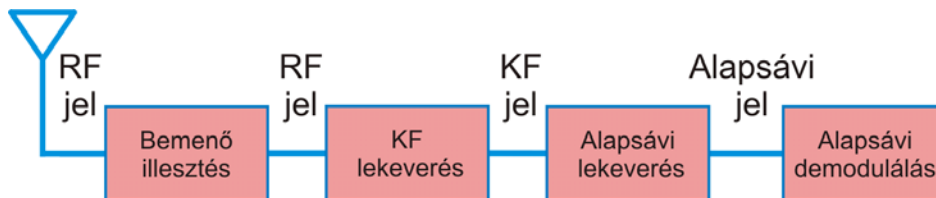
NAGY SÁVSZÉLESSÉGŰ JELFELDOLGOZÁS KIHÍVÁSAI

Bevezető

Sokszor halhattuk azt az elcsépelet frázist, hogy a mai információs (post-indusztriális) társadalmunk legfőbb értéke az információ (most még az ember után). Az információk gyors, hibamentes, időszerű továbbításának elengedhetetlen feltétele, a korszerű távközlési-informatikai infrastruktúrák mind fejlettebb és integránsabb alkalmazása. A mai korszerű kommunikációs megoldások a nagy sávszélességű, nagy kapacitású átviteli vonalak kialakulását hozták magukkal. Ezen távközlési vonalak (Wi-Fi, Wimax, sokcsatornás rádiórelé, hopping adások, műholdas távközlő vonalak) felderítésére, monitorozására alkalmas berendezések fejlesztése számos kihívással állítja szembe fejlesztőjét. A következőkben egy korszerű, a mai kor színvonalának legjobban megfelelő berendezés fejlesztésének lépéseit szeretném bemutatni, gyakorlati szempontok figyelembe tartása mellett. A fejlesztendő berendezés filozófiáját tekintve szoftver-rádiós megoldás kell hogy legyen, mivel az alkalmazott átviteli módok széles skálája más megoldás létjogosultságát eleve elveti. A mai korszerű híradásokat figyelembe véve elmondhatjuk, hogy a polgári infrastruktúrák technológiai szintje beelőzte a katonai berendezéseket, sőt sok esetben a katonai híradó rendszerek gerincét polgári távközlési infrastruktúra képezi. Ezen rendszerek monitorozása, esetleges lehallgatására alkalmas eszköz

Analóg rádióvevők általános felépítése

Mielőtt részletesebben tárgyalnánk a szoftver-rádiók technológiáját, szeretnék áttekintést adni a vevő berendezésekről általában. A következő ábrán egy általánosan használt vevő felépítését láthatjuk.



1. ábra Egy analóg vevő általános felépítése

A vevőkre általában igaz az, hogy a bemenetükön a levegőből érkező elektromágneses hullámokat egy antenna segítségével vezetett jellé alakítjuk. Ezen vezetett jel szintje minden esetben nagyon alacsony. A **bemenő fokozat** feladata ezen kis szintű jelek, kis zaj hozzáadása mellett történő erősítése, a középfrekvenciás fokozat számára szükséges mértékig. A kis zajú erősítésen túl a lehető leglineárisabb viselkedés is fontos kihívást jelent. Ebben a fokozatban nem megengedhetőek a torzítások, mivel ezek a vevő elválasztó képességét (szelektivitását) drasztikusan ronthatják. A következő nagy egység a **középfrekvenciás keverő fokozat**. Ebben a fokozatban a bemenő széles frekvencia tartomány egy lényegesen keskenyebb sávszélességben átváltunk egy másik tartományba. Az itt alkalmazott elemek már keskenyebb sávszélességben működnek ezzel jól kézben tarthatóvá téve tulajdonságaikat. A következő nagy egység a **középfrekvenciás fokozat (KF)**, amely a vevő elsődleges szelektivitását határozza meg. Itt valósul meg a teljes vevő erősítésének döntő része, illetve ebben a fokozatban tudjuk biztosítani az automatikus erősítés szabályozást is. Ezen egység feladata a középfrekvenciás jel alapsávba (jellemzően 0 Hz-re) történő transzponálása. A következő

nagy egység az **alapsávi demodulátor**. A kisugárzott jel eredeti információ tartalmához ebben a fokozatban jutunk hozzá.

Szoftver által definiált rádiók

Napjaink vételtechnikájának meghatározó eleme a szoftverrádió technológia. Ez egy képesség technológia (enabling technology) amelynél az alkalmazott alapelvek a következőkben foglalhatók össze:

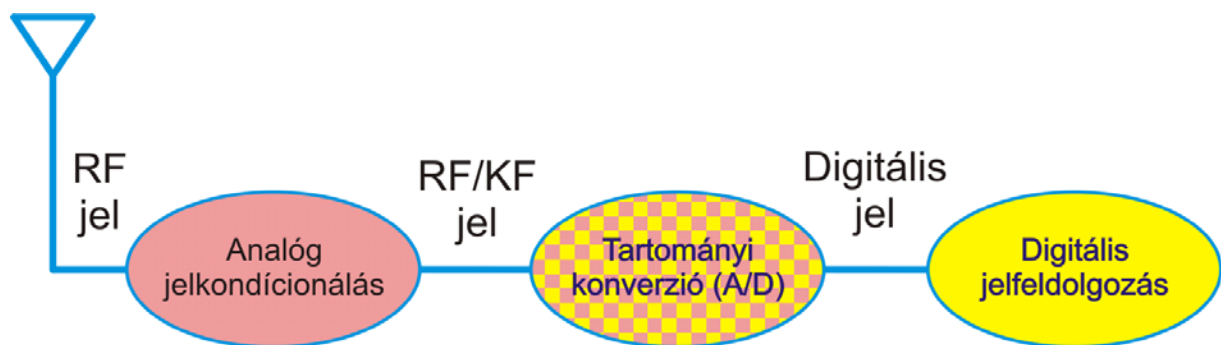
a berendezés végső tulajdonságát az elkészített és implementált szoftver határozza meg, univerzálisan felhasználható elemekből épül fel, könnyen átprogramozható funkcionálisan tagolt blokkokból áll, hardveres módosítás nélkül továbbfejleszhető, ezáltal értékálló berendezés.

A szoftver rádió nem termék, hanem technológia, egyfajta készülék-építési filozófia, egy modell.

A szoftverrádiók (digitális vevők) több szempont alapján csoportosíthatók. A következőkben az implementációs mélységük alapján fogom elhelyezni a különböző készüléktípusokat.

1.1. Digitális rádióvevők általános felépítése

A következő ábrán egy digitális vevő általános felépítését láthatjuk.

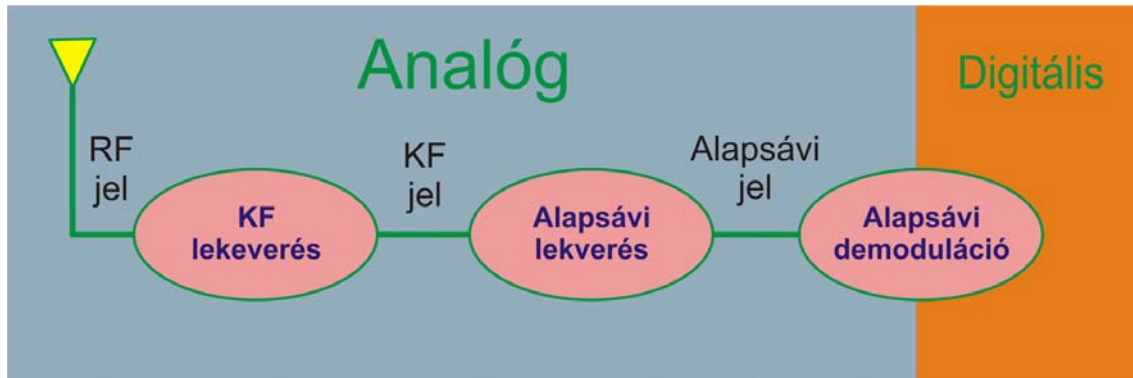


2. ábra Egy digitális vevő általános felépítése[1]

Az analóg vevőkhöz hasonlóan itt is minden esetben egy illesztő fokozatot találunk a vevő bemenetén. A digitális vevők (szoftver által definiált rádió) analóg bemeneti fokozatának felépítése függ az implementációs szintjétől. Az minden esetben elmondható, hogy az analóg fokozatot vagy fokozatokat egy tartományi konverzió követ. Ez a konverzió képez kapcsolatot a folytonos analóg világ és a diszkrét mintavételezett, matematikai eljárások birodalma között. Itt az esetek döntő többségében a konverziót egy A/D átalakító valósítja meg. Minden vevő utolsó fokozata a digitális jelfeldolgozással megvalósított jelkezelés. Ezen jelkezelés valamilyen típusú digitális jelfeldolgozó egységben valósul meg. Ezek általában újraprogramozható hardver elemek (FPGA/EPLD), vagy digitális jelfeldolgozó processzor lehetnek. Az asztali számítógépek központi egységének robbanásszerű fejlődésével ezen processzorok is bekerültek a feldolgozási láncba, illetve a játékosok által használt nagyteljesítményű videokártyák is használatossá váltak ezen területen. (néhány kártya közel 1TFlop teljesítményt kínál, relatíve olcsón) A következő alfejezetekben láthatjuk a különböző implementációs szintekhez tartozó készülékek általános felépítését.

1.1.1. Digitális kimeneti jelkezelés

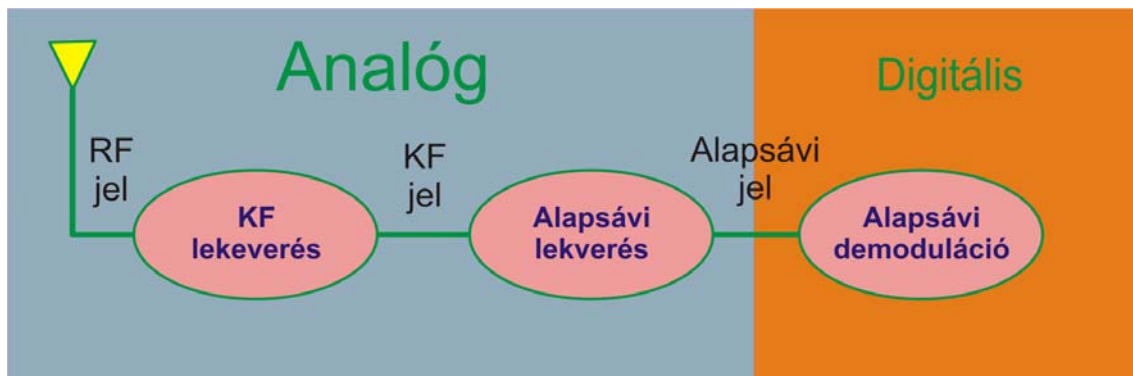
A 3. ábrán látható, hogy az ilyen típusú berendezések csak az alapsávi demoduláció után végzik el a digitális jelfeldolgozás műveletét. Ez azt jelenti, hogy a teljes analóg szerkezeti láncon végighalad a jel, annak minden hibájával együtt. Ezek a struktúrák általában akkor használatosak, amikor egy meglévő analóg adó-vevő struktúrába kell beilleszteni a digitális feldolgozó részt. A telefonokon működő modemek lehet erre az eljárásra példa. Itt a teljes átviteli út analóg módon zajlik.



3. ábra Kimeneti jelfeldolgozással ellátott vevő[1]

1.1.2. Digitális alapsávi feldolgozás

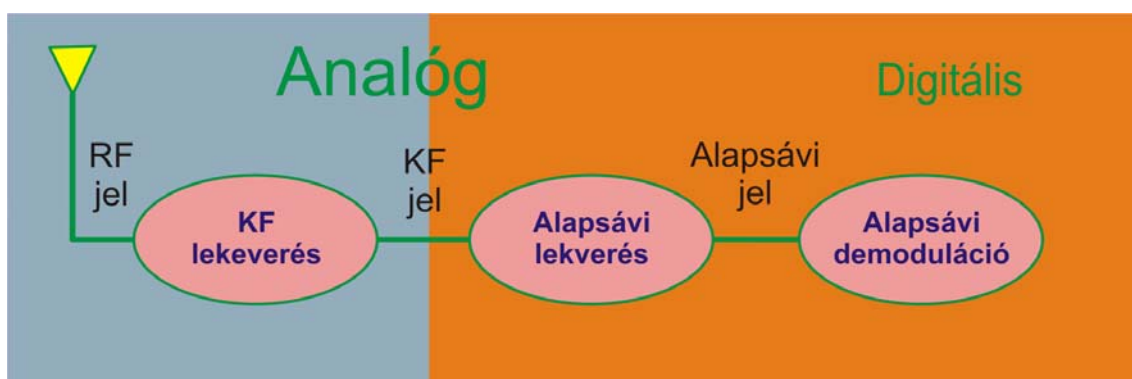
A következő megvalósítási szinten már a demodulációs eljárás is digitálisan valósul meg, igaz alapsávi jelen. Erre lehet példa a rövidhullámon alkalmazott DRM (Digital Radio Mondiale) eljárás, ahol a meglévő rövidhullámú analóg műsorszórás digitalizálása ilyen módon valósult meg. Itt az eredeti 9 kHz-es sáv szélességben CD minőségű adásokat lehet továbbítani. Itt egy egy-oldalsávú vevő rövidhullámú vevő középfrekvenciás kimenetére kötött számítógép hangkártyáján keresztül lehet demodulálni a kiváló minőségű adást, amelyet OFDM üzemmódban sugároznak ki és wma (windows media audio) eljárással tömörítenek.



4. ábra Digitális alapsávi feldolgozású vevő[1]

1.1.3. Digitális középfrekvenciás feldolgozás

A mai korszerű berendezések döntő többsége (a kis és nagy sávszélességű modemektől kezdve a GSM/UMTS mobil telefonokon át a földi digitális műsorvevőig) ezen az elven valósítják meg működésüket. A 4. ábrán látható elrendezésben valósul meg a vétel. Itt az analóg fokozat (KF lekeverés) feladata a tartományi konverziót megvalósító eszköz felbontás és sebesség tartományába illeszteni a bemenő jelet. A KF jel sávszélességi és dinamika jellemzői meg kell hogy feleljenek a A/D átalakító paramétereinek. Az átalakító paramétereinek túl jónak sem érdemes lennie, mert ez ebben a költségérzékeny világban, indokolatlanul megdrágítaná a berendezést. Azon kihívások amelyek a szélessávú digitális jelfeldolgozás során felmerülhetnek, ezen berendezések működése közben teljes egészében előfordulnak.

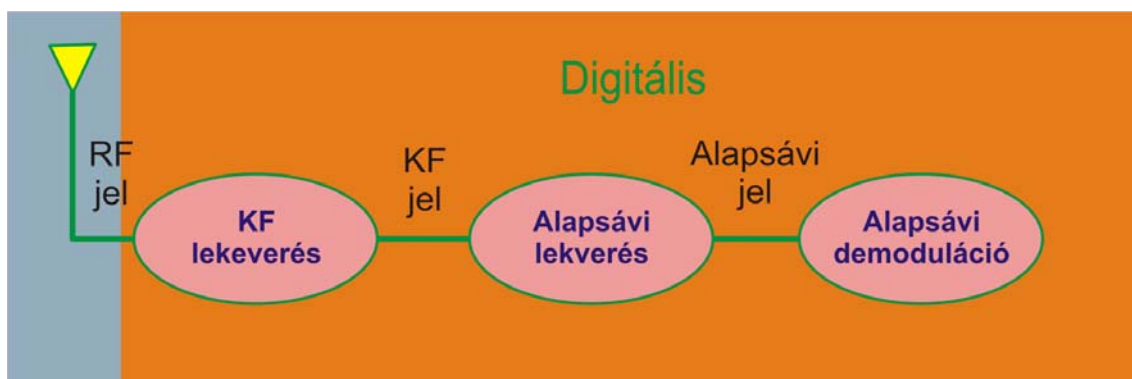


5. ábra Digitális középfrekvenciás feldolgozású vevő[1]

1.1.4. Digitális rádiófrekvenciás feldolgozás

A klasszikus értelemben vett szoftver-rádiók (amelyek tulajdonságait tisztán a működtető szoftver határozza meg) ebbe a csoportba sorolhatók. Itt tulajdonképpen a bemenő jel minimális kondicionálás (erősítés, sávszűrés) után azonnal A/D átalakítóra kerül. Ebben az esetben kell a legszigorúbb előírásokat teljesíteni ezen átalakítóknak, és azt meghajtó áramköröknek.

A következő fejezetben ezen kihívások közül a mintavételi sebesség és felbontás kérdésével kívánok foglalkozni. Ezen két paraméter megvalósíthatósága és valódi értéke képezi kutatásom egyik fő irányát, illetve olyan építési mód kialakítása és megvalósítása, amely gyakorlatban megvalósíthatóvá teszi ezt.



6. ábra Digitális rádiófrekvenciás feldolgozású vevő[1]

Műszaki kihívások

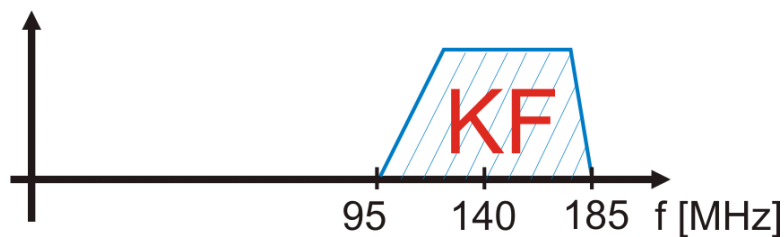
Mint az előző fejezetben láttuk a nagy sávszélességű jelfeldolgozási nehézségek a 3. és 4. csoportba sorolható vevők működése során keletkezhetnek. A digitális középfrekvenciás feldolgozású vevők KF fokozatában történik az A/D átalakítás. A középfrekvencia értéke széles skálán mozoghat. A nagy sávszélességű alkalmazásokban a 70 illetve 140/160 MHz az általánosan használt érték, bár nem ritkák azon berendezések, amelyek 0 Hz-es második „középfrekvenciát” használnak (ez utóbbi berendezéseket direkt konverziós vevőknek nevezzük). Professzionális vevőkben általános, hogy nem egy hanem több középfrekvenciát használnak a nagyobb érzékenység és szelekció megvalósítása érdekében. A mintavételi frekvencia meghatározására a mintavételi törvény ad útmutatást:

$$f_s \geq f_{\max} * 2$$

- *Ahol:*
- f_s : *mintavételi frekvencia*
- f_{\max} : *a jelben előforduló maximális frekvenciás összetevő*

7. ábra Nyquist kritérium[2]

A KF fokozat legnagyobb értékének minimum 2-szeresével kell mintát vennünk a jelből. Egy egyszerű példánál: 140 MHz-es KF frekvencia és 90 MHz-es sávszélesség esetén:



$$f_s \geq \left(f_{KF} + \frac{B_{KF}}{2} \right) * 2$$

8. ábra 90 MHz sávszélességű jel 140 Mhz-es KF-en

Ebből a példából kiindulva a mintavételi frekvencia 370 MHz-re adódik. Elsőre ijesztőnek hat ez az érték, de látványosan csökkenthetjük a mintavétel frekvenciáját, amelyet a következő fejezetben tárunk fel részletesen. Ezt megelőzően azonban a nagysebességű mintavételezés eszközeinek működését mutatom be.

1.2. Dinamikai előírások

Az előzőekben az átalakítás sebességére tettünk előírásokat. A sebességen túl a dinamikai előírások alapján az átalakítás bitmélységére kell előírásokat megfogalmaznunk. A dinamika a legkisebb és a legnagyobb szintű jelek viszonyát határozza meg.

$$D = 20 * \log \frac{u_{\max}}{u_{\min}}$$

9. ábra A dinamika kiszámítása

A gyakorlatban elmondható, hogy a teljesen digitális rádiófrekvenciás feldolgozású vevők dinamika tartománya kb. 100-120 dB kell, hogy legyen. A digitális középfrekvenciás feldolgozású vevők dinamika tartománya kb. 60-80 dB. A megfelelő A/D átalakító kiválasztásánál ezen értékek kell irányadónak tekinteni.

A következő táblázatban foglaltam össze a megfelelő jel-zaj viszonyhoz tartozó bitmélységeket. A táblázatban 10 Voltos maximális bemenő feszültséghez tartozó értékek vannak kiszámolva.

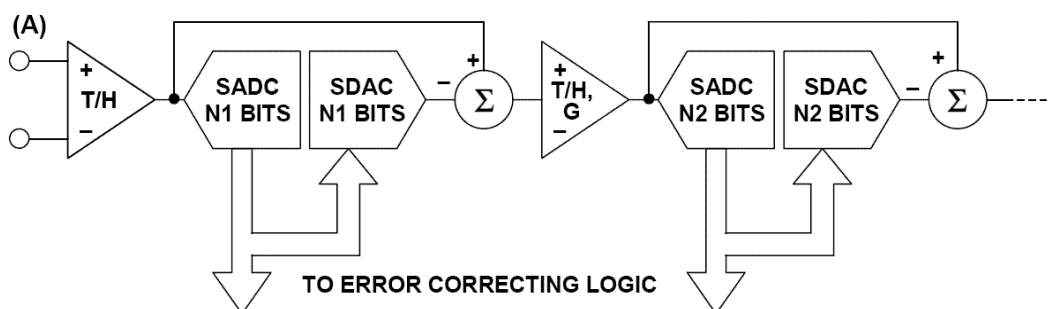
Felbontás (bit)	Lépcsők száma	Felbontás (Volt)	Pontosság (ppm)	dBFS [dB]
2	4	2,5 V	250 000	-12
4	16	625 mV	62 500	-24
6	64	156 mV	15 625	-36
8	256	39 mV	3 906	-48
10	1024	9,8 mV	977	-60
12	4096	2,4 mV	244	-72
14	16384	610 μ V	61	-84
16	65536	153 μ V	15	-96
18	262144	38 μ V	4	-108
20	1048576	9,5 μ V	1,0	-120
22	4194304	2,4 μ V	0,2	-132
24	16777216	596 nV	0,1	-144

10. ábra A/D átalakítók dinamika viszonyai[3]

Az előző okfejtésünkből és a táblázatból elmondható, hogy a digitális rádiófrekvenciás feldolgozású vevőkhöz legalább 16 bites A/D átalakítót kell alkalmazni, a digitális középfrekvenciás feldolgozású vevőkhöz pedig legalább 10-12 bites átalakítót kell használni.

1.3. Nagysebességű A/D átalakítók

A nagysebességű és nagy felbontású A/D átalakítók megtervezése nagy kihívást jelentett a tervező mérnökök számára. Jól ismert módszer volt az ún. direkt (flash) A/D átalakítás, amely kb. 10 bites felbontásig valósítható meg nagy sebességgel, a bemeneten párhuzamosan elhelyezkedő komparátorok kapacitív terhelése miatt. Az előzőekben megállapítást nyert, hogy legalább 12-bites átalakítót kell használni. Ezt a technológiai lépést a pipeline típusú átalakítók tették lehetővé. Ezen átalakítók elve az, hogy több fokozatban történik az átalakítás. Minden egyes fokozatban egy kis felbontású A/D és egy D/A átalakító működik. A fokozatban a bemenő jelből kivonódik a kis felbontású jel a D/A átalakító segítségével. A működés a következő ábrából könnyen megérthető.

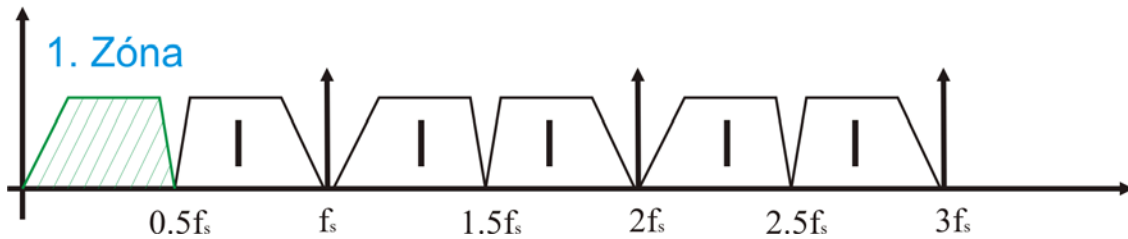


11. ábra Pipe-line típusú A/D átalakító[4]

Amíg a hagyományos típusú konverterek a mintavevő órajel után közvetlenül szolgáltatják a kvantált értéket, itt a fokozatok számától függő késleltetéssel kell számolni. Ez fázisérzékeny megoldásoknál (iránymérő) esetlegesen gondot okozhat, amelyet szoftveres úton kell korrigálni! Ilyen felépítésű konverterrel jelenleg 16 bit / 160 MHz-es átalakítók készíthetők. Ha kisebb felbontásnál 14 bit / 400 MHz a felső korlát.

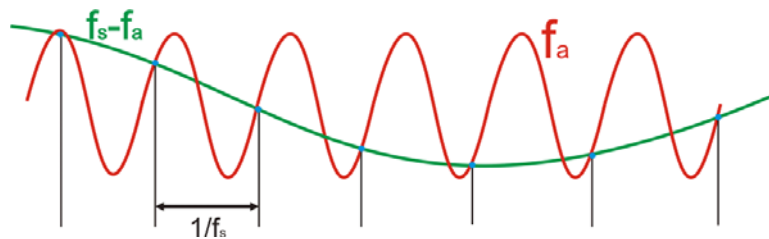
1.4. Alul-mintavételezés

A 12.ábrán látható, hogy a mintavételi frekvencia feléig ($f_s/2$) használható az átalakító elméletileg.



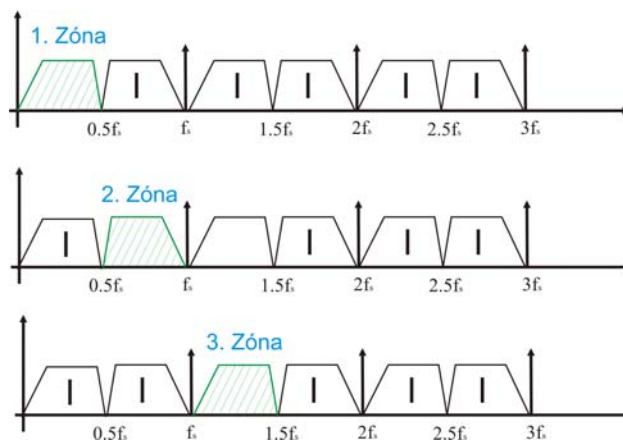
12. ábra Mintavételi zónák alakulása[3]

Amennyiben biztosítjuk azt a feltételt, hogy a mintavett jel sávhatárolt, átlapolódás mentes, akkor lassabb mintavétellel is megvalósíthatjuk a tartományi konverziót. Miért tehetjük ezt meg? A következő ábrán láthatjuk az alul-mintavételezés elvét.



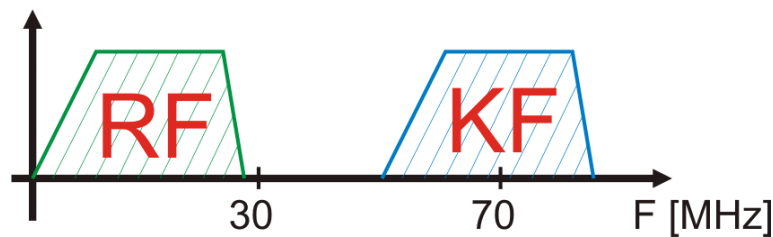
13. ábra Alul-mintavételezés az idő tartományban[3]

A pipe-line típusú átalakítók bemenő (mintavevő) fokozatuk nagyon kis ideig (1 ns) vesznek mintát a jelből. Ezzel a módszerrel az átalakító mintavevő fokozata nagyobb sáv szélességű, mint a mintavételi frekvencia, akkor a következő Nyquist-zóna jele is mintavételezhető.



14. ábra Nyquist-zónák alakulása[3]

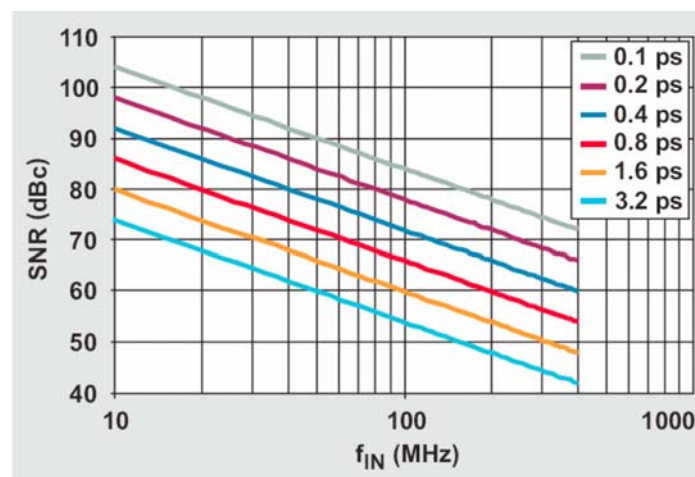
Ha alkalmazási szinten vizsgáljuk a zónákat, akkor a 1. zónát a teljesen digitális rádiófrekvenciás feldolgozású vevők, míg a 2. zónát (általában) a digitális középfrekvenciás feldolgozású vevők felségterületének nyilváníthatjuk. Példa erre a következő ábra.



15. ábra 1. és 2. Nyquist-zóna alkalmazása

1.5. Mintavevő órajel

Elérkeztünk egy nagyon fontos és lényeges területhez. Az átalakítók önmagukban meghatározzák a berendezésük lehetőségeit, de ezek kiaknázására biztosítaniuk kell a megfelelő infrastruktúrát is. Ennek egy jelentős területe az órajel előállítás problémája. Amennyiben nagysebességű és nagy felbontású konvertert kell használnunk, úgy nagyon tiszta (jitter-mentes) mintavevő órajelre is szükségünk van. A következő ábrán az elméleti minimum értékeket lehet megtekinteni.



16. ábra Jitter előírások[5]

1.5.1. Alacsony jitter tartalmú órajel előállítása

A jitter az órajel él bizonytalanságát jelenti. Azaz mennyire pontosan történik az órajel felfutó éle az elméleti periódus időhöz képest. Mint látjuk nagyfrekvenciájú jeleknél ez a ps-nál (10^{-12} s) is kisebb érték kell, hogy legyen. Ennek megvalósítása nagyon nagy kihívás. Kutatásaim és kísérletezésem során megállapítást nyert, hogy ezen feltételeknek csak abban az esetben lehet megfelelni, ha az alaposzcillátor lényegesen nagyobb frekvenciájú, mint a mintavevő órajel értéke és ezt valamilyen úton leosztással állítom elő! Az alaposzcillátornak is nagyon kis fáziszajának kell lennie. Ez lehet egy SAW (surface acoustic wave) oszcillátor, vagy egy analóg módon felszorzozott atom-alapú oszcillátor. Ennek kimenő jele egy DDS-sel (direct digital syntheser) kerül leosztásra, amely azzal az előnnyel is jár, hogy a mintavételi frekvencia Hz (vagy az alatti) pontossággal beállítható. A DDS kimenetét egy hangolható sávszűrővel korlátozva megvalósíthatóvá válik az előírtaknak megfelelő tisztaságú mintavevő jel.

1.5.2. A jitter értékének kiszámítása

Az oszcillátorok adatlapján nem olvashatunk jitter értékeket, lévén ezek analóg jelforrásnak tekinthetők, ezért itt csak a fáziszajra vonatkozóan találhatunk karakterisztikákat. Amennyiben a mintavételhez szükséges határokat szeretnénk megállapítani, abban az esetben ezt a fáziszaj karakterisztikát át kell konvertálnunk jitter értékre.

$$\sigma = \frac{1}{2\pi f_s} * \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} 2 * \Lambda(t) \delta t}$$

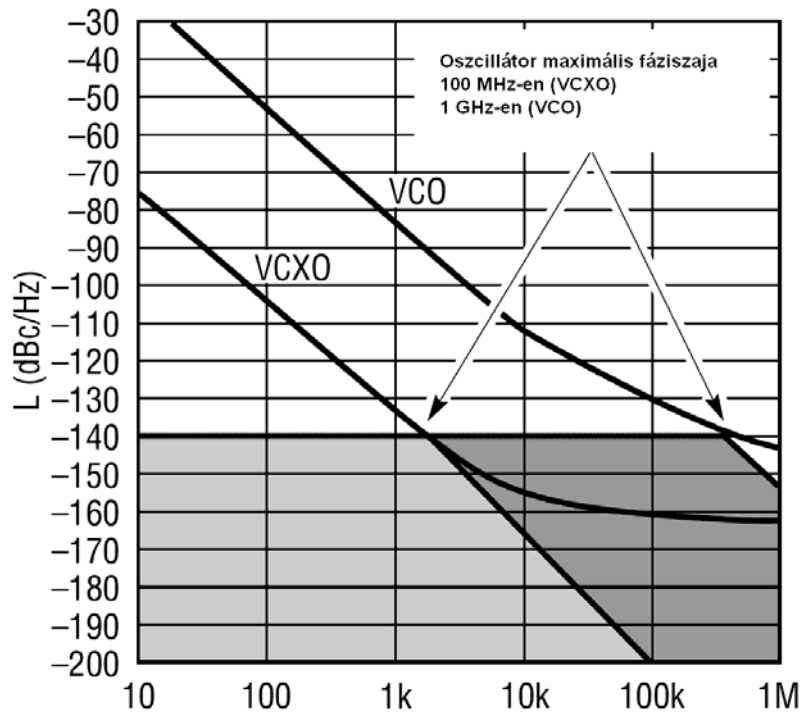
Ahol

f_s : mintavételi frekvencia

$\Lambda(t)$: Fáziszaj karakterisztika

17. ábra Fáziszaj konvertálása jitter értékre [6]

A képletben szereplő f^1 és f^2 érték 12 kHz-től 20 MHz-ig lévő tartományokat jelentenek. Ezek alapján, a következő ábrán található karakterisztika adódott.

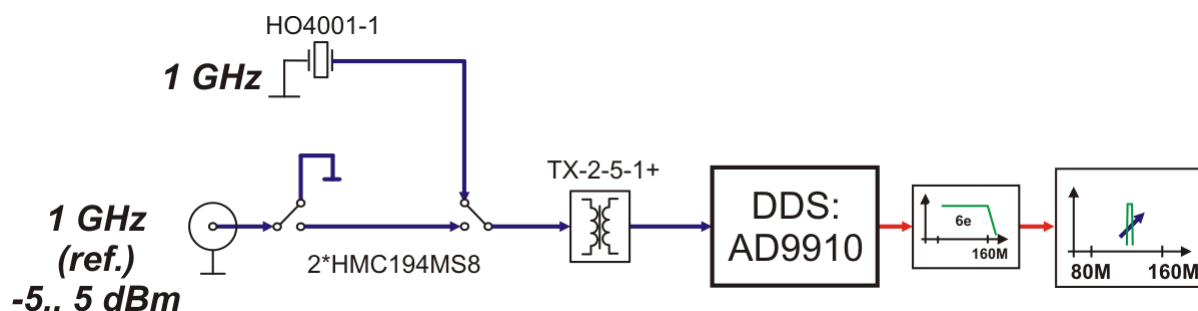


18. ábra Elvárt fáziszaj karakterisztikák[6]

Ezen elvárásoknak valóban csak az előző fejezetben említett technológiájú oszcillátorok felelnek meg.

1.5.3. Órajelel előállítás megvalósítása

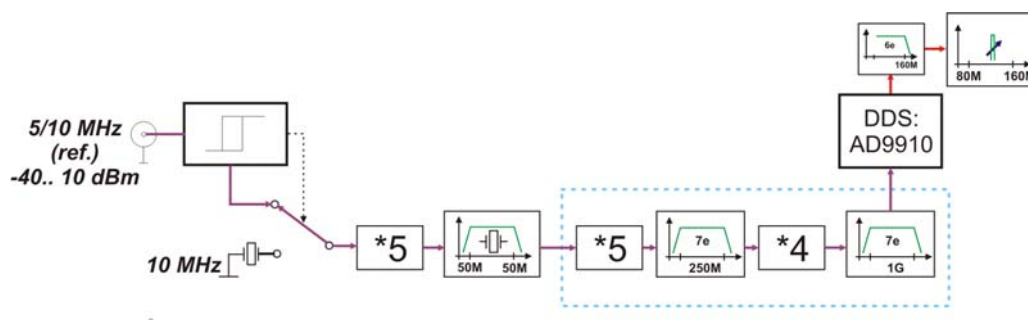
Minden eddig említett kritériumnak megfelelő órajelel előállító fokozat a következő módon kell, hogy felépüljön:



19. ábra Korrekt órajelel előállító fokozat 1. változat

Ebben az esetben 1 GHz-es SAW oszcillátor adja az alap órajelet és ez kerül egy nagysebességű DDS áramkörre. Ennek a kimenete (a maximális zajszegénység miatt) egy hangolható sávszűrőn halad át. Ezzel akár 18 bites átalakítók is meghajthatók 150 MHz-es mintavételi frekvenciáig.

Amennyiben kisebb frekvenciás alap oszcillátorból kell órajelet előállítani, akkor lényegesen bonyolultabb és drágább megoldást kell alkalmazni.



20. ábra Korrekt órajelel előállító fokozat 2. változat

Alapjaiban hasonlít az előző típushoz, csak az 1 GHz-es jel előállításáig egy lényegesen bonyolultabb eljárást kell alkalmazni. Ezzel 16 bites átalakítókat lehet meghajtani az előbbiekhöz hasonló frekvenciatartományig.

1.6. Analóg bemenő fokozat

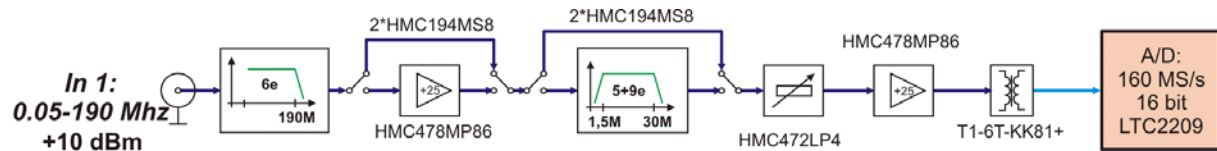
Az korrekt órajelel előállításához hasonlóan gondos tervezést igényel a bemeneti analóg fokozat is. Mit sem ér a legszigorúbb elvárásoknak is megfelelő konverter, ha nincs megfelelő módon illesztve az analóg világhoz!

A bemenő fokozatnak 3 elvárást kell teljesítenie:

- alacsony zaj
- megfelelő erősítés
- kis torzítás

A fenti 3 elvárásnak kevés alkatrész tud megfelelni, illetve ezen alkatrészek implementációja is nagy gondosságot igényel (alkatrészek elhelyezése, jelvezetéke megfelelő rajzolata, stb..). Hosszas keresés végeredményeként olyan mikrohullámú alkatrészek kerültek kiválasztásra, amelyek ezen 3 követelményrendszernek meg tudtak felelni. Meglepő lehet, de gyakorlati

megvalósítások során ezek produkálták a legjobb viselkedési paramétereket (bár határfrekvenciájuk nagyságrendekkel a használati frekvencia felett volt). Számos olyan probléma merült fel ezen alkatrészekkel, amelyek kis frekvencián nem kerültek volna előtérbe. Az árnyékolásoknak olyanoknak kellett lenniük, amelyek a több GHz-es tartományban is megfelelő elválasztást kellett produkálniuk. Több olyan eszköz is van, amely áthidalt jelút esetén nem kap tápfeszültséget a gerjedés megakadályozása miatt. A következő ábrán látható az analóg fokozat megvalósítása:

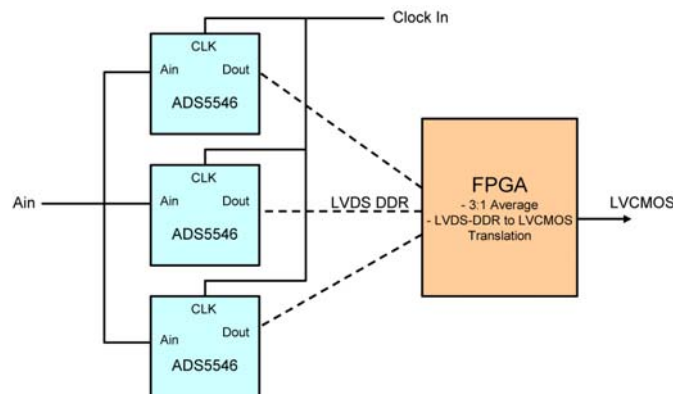


21. ábra Analóg front-end

Mint látható a jelútban viszonylag egyszerűen megvalósítható elemek találhatóak, amelyek tervezése kisebb odafigyelést igényel (az elhelyezési és vezetékvezési odafigyelést leszámítva). A fenti elemeket használva mind a tisztán digitális rádiófrekvenciás feldolgozású vevő, mind a digitális középfrekvenciás feldolgozású vevő is megvalósítható.

1.7. Zajcsökkentés átlagolás segítségével

A legmondosabb tervezés esetén is lehetnek olyan estek, ahol szükségük van néhány dB-es többlet jel-zaj viszonyra. Erre kínál lehetőséget számunkra a matematika. Növelhetjük áramkörünk zajtartalmát, amennyibe nem egy hanem több konvertert járátunk párhuzamosan, és ezek kimenő értékeinek átlagát vesszük. Ebben az esetben a konverterben keletkezett zajokat (mivel azok korrelálatlanok és várható értékük 0) csökkenthetjük.



22. ábra Átlagolással történő zajcsökkentés[7]

Összefoglalás

Talán sikerült az előző fejezetekben felkelteni az érdeklődést a digitális jelfeldolgozás iránt, illetve bemutatnom azt, hogy „viszonylag egyszerű” tervezési módszerrel, de megfelelő előkészítés után olyan hardvert előállítani, amely alkalmas széleskörű vételtechnikai megoldások kivitelezésére. A technológia megengedi számunkra azt, hogy az egészen kis sávzélességtől a viszonylag nagy sávzélességig ugyanazon hardver felhasználásával vevőkészüléket építsünk professzionális célra. A vevő tulajdonságait, működését tisztán szoftver útján meghatározva, könnyen fejleszthető olcsó megoldást kínálunk az adatszerzés igényeinek megfelelően.

Irodalomjegyzék

- [1] Dr Eged Bertalan - Szoftver rádió technológia korszerű infokommunikációs eszközökben.
<http://www.sagax.hu> - 2007.06.30.
- [2] Dr. Wersényi György - A digitális hangtechnika alapjai -
<http://vip.tilb.sze.hu/~wersenyi/Kiegeszites.pdf> - 2006.11.05.
- [3] Walt Kester and James Bryant- Basics of ADCs and DACs
<http://www.dspdesignline.com/howto/201002110;jsessionid=EDSMU0MASUJUIQSNDLRC KHSCJUNN2JVN?pgno=2> - 2007.11.05.
- [4] Walt Kester - ANALOG-DIGITAL CONVERSION
<http://www.analog.com> - 2007.06.30.
- [5] Charles Sanna - Using high-IF sampling A/D converters beyond baseband frequencies
<http://www.planetanalog.com/showArticle.jhtml?articleID=201804147> - 2007.11.05.
- [6] Maxim Inc. - Random Noise Contribution to Timing Jitter
<http://www.maxim-ic.com/an3631> - 2007.09.10.
- [7] Thomas Neu and Grant Christiansen : Multiple A/Ds versus a single one: pushing high-speed A/D converter SNR beyond the state of the art
<http://www.planetanalog.com/showArticle.jhtml?articleID=200900432> - 2007.09.10.