



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Akusztikus MEMS szenzor vizsgálata

Önálló laboratórium zárójegyzőkönyv
2014/15. I. félév

Sós Bence

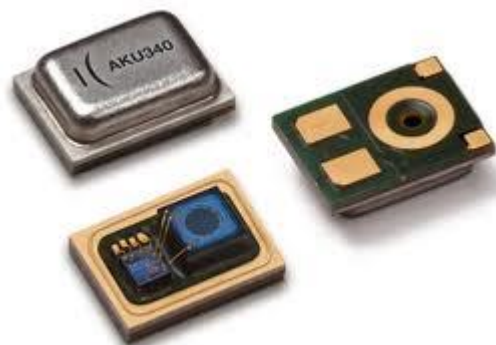
III. évf, villamosmérnök szakos hallgató
BSc Beágyazott információs rendszerek ágazat

Konzulens:

Fehér Béla docens
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

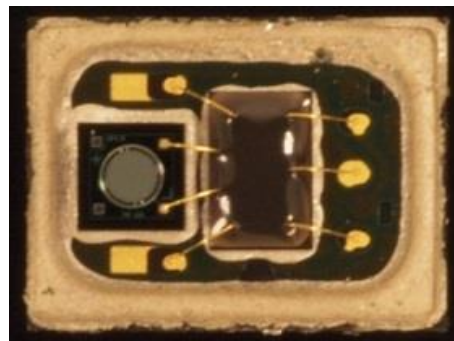
Tartalom:

- Feladatkiírás
- Bevezetés, célkitűzés
- Előzmények, elmélet:
 - A MEMS mikrofonok
 - PDM jel
 - Kinyerhető információ
- Alkalmazott megoldás
 - A CIC szűrő
- Tapasztalatok, értékelés
 - Egyéb struktúrák
- Irodalomjegyzék
- Mellékletek



Feladatkiírás

A MEMS technológia alkalmazása segítségével gyártott akusztikus szenzorok, mikrofonok műszaki paraméterei sokat fejlődtek az elmúlt években és sok tekintetben képesek kiváltani a hagyományos, olcsó mikrofonokat. Ezek a mikrofonok jellemzően digitális interfésszel rendelkeznek, a két elterjedt kimeneti jelforma a PDM és az I2S interfész. Az önállólaboratórium feladat célja ezen eszközök használati lehetőségeinek vizsgálata speciális akusztikus szenzormegoldások esetében.



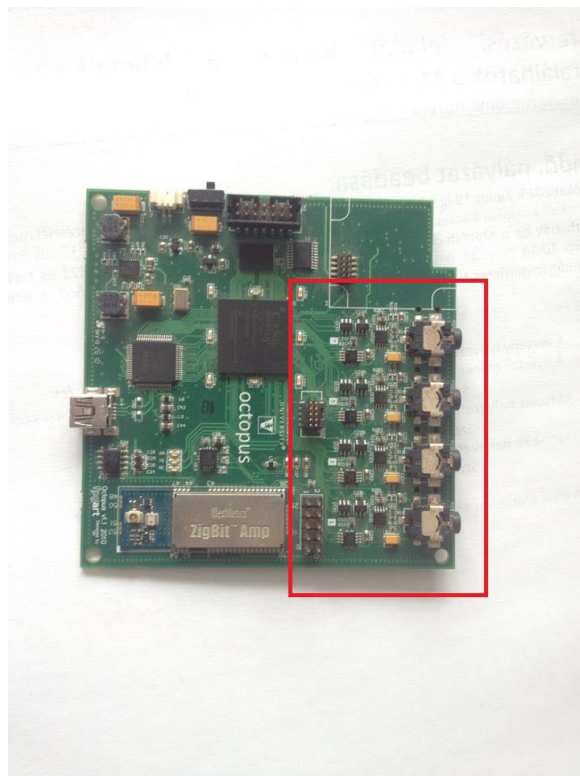
Bevezetés, célkitűzés:

A feladatom a BME MIT tanszéken folyó akusztikus lokalizációs projekt támogatása digitális kimenetű mikrofonok vizsgálatával.

Célunk az analóg elektronika kiváltása digitális kimenetű mikrofonokkal. A jelformázás, jelerősítés és Analóg-digitális konverzió sok erőforrást emészt fel. A jobb oldalt lévő képen egy régebbi megoldása látszik a feladatnak. A képen jól látszik, hogy a jelkondicionálás és konverzió a panel egyharmadát foglalja el. Ez sok erőforrást jelent, mind hely mind, fogyasztás szempontjából.

Ha ezt ki tudjuk küszöbölni, akkor csökkenthetjük a rendszer méretét fogyasztását és árát. Ezek a paraméterek változása mellett akár azt is megengedhetjük, hogy a szenzorok számát is megsokszorozzuk a pontosság növelése érdekében.

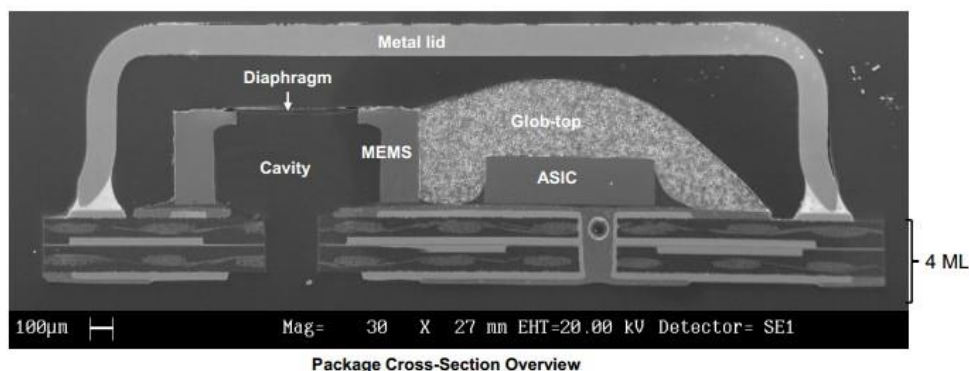
Célunk az is hogy az előző megoldásoknál egy rugalmasabb és adaptívabb megoldást dolgozzunk ki, erre a digitális kimenetű szenzorok szintén alkalmasabbnak tűnnek. Változtatható mintavételi frekvencia és amplitúdó felbontás miatt.



Előzmények, Elmélet

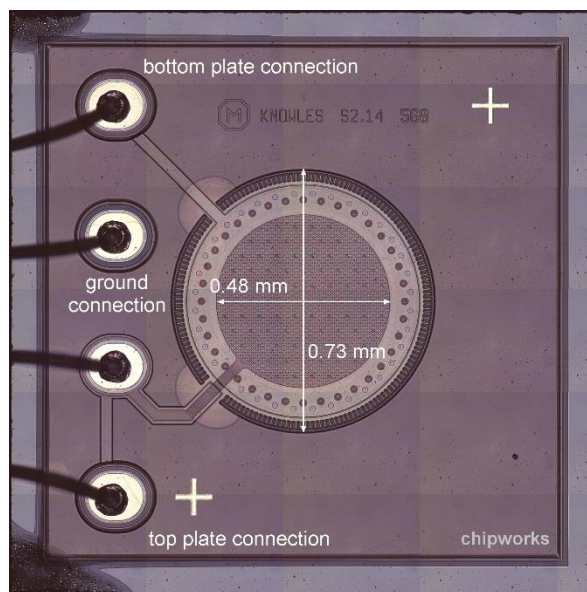
MEMS mikrofonok:

MEMS jelentése Microelectromechanical systems, a lényege, hogy közvetlenül a szilícium a lapkára van integrálva mind a mechanikus, mind az elektronikus része a szenzornak.



Számunkra lényeges előnyös tulajdonságok:

- Nagyon kis méret, közel pontszerű érzékelés.
- Omnidirekcionális.
- SI chipre integrált jelkondicionálás és Analóg digitális konverzió.
- Közvetlen Digitális I/O-hoz illeszthető kimenet.
- Több féle kommunikációs lehetőségek (PDM, I²S)
- Párosával összekapcsolhatók, sztereó kimenet generálásához.
- Jó zavarelnyomás
-



MEMS mikrofon membrán

Mikrofon kimenetek, kommunikációs lehetőségek:

Alapvetően 2 opció létezik a piacon, az egyik az I²S (Inter-IC Sound), ez a protokoll kimondottan jó minőségű beszédhang átvitelére szolgál.

Legfőbb tulajdonságai:

- Soros átvitel.
- 24 bites csomagok.
- 3.2 MHz - es Master clock.
- 50 kHz Mintavételi frekvencia.

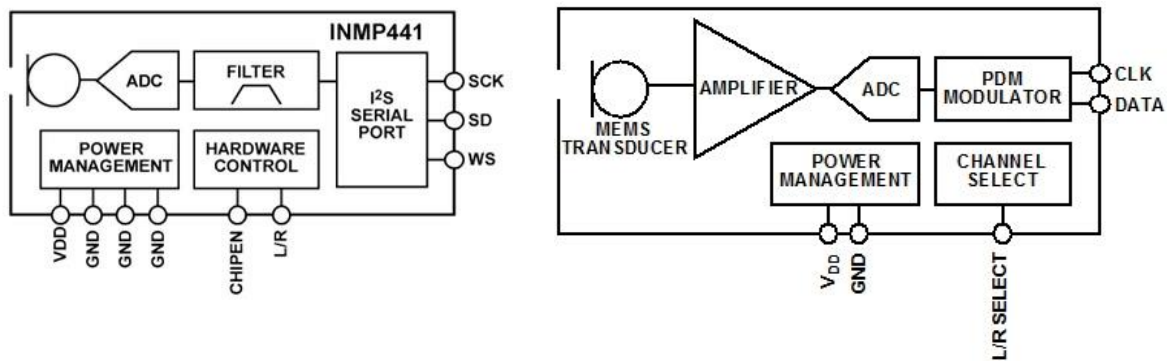
Ezek alapján elmondható, hogy ez a protokoll használata nem célszerű akusztikus lokalizációhoz a kis mintavételi frekvencia miatt.

A másik lehetőség a PDM (Pulse Density Modulation) kimenet:

A PDM kimenet az egy egy bites ADC konverter kimenté, ahol a pulzusok gyakorisága hordozza az információt. Ennek egy speciális esete a PWM jel, ahol a frekvencia állandó. (felfutó élék ugyanannyi időnként vannak) A két moduláció 0 és 100%-os kitöltés mellett azonos kimenetet produkál.

Alapvető tulajdonságai:

- Soros (1 bites) bitstream hordozza az információt
- 3.072 MHz es maximális órajel
- Utólagos digitális jelfeldolgozást igényel
- Feldolgozás nagyon rugalmassá teszi, tetszőlegesen változtatható mintavételi frekvencia.

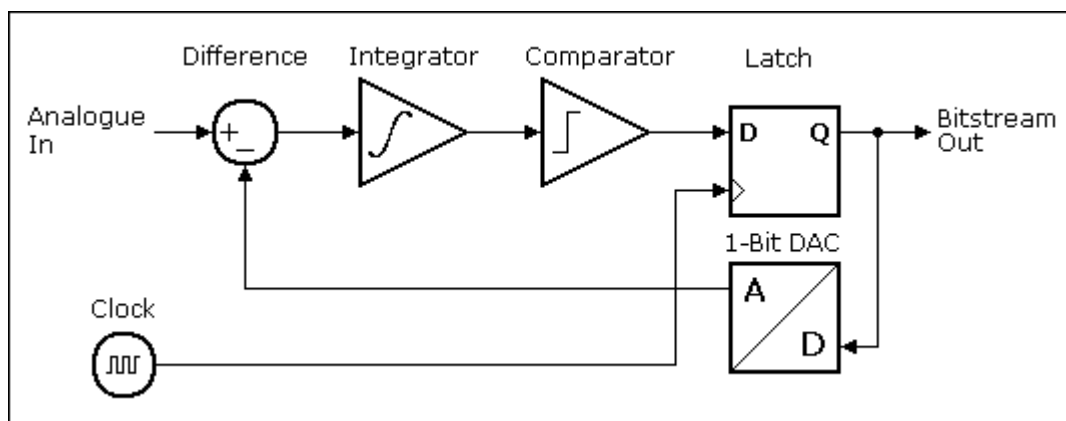


I²S és PDM mikrofon felépítése

A PDM jel

A PDM jel az, ami a sigma-delta modulátorból kijön. Az általunk használt MEMS mikrofonokban ilyen negyedrendű modulátor van, a lenti ábrán látható egy elsőrendű modulátor.

A PDM jel alapvetően hasonló a PWM jelhez, ami PDM egy speciális este. A PWM jel egy olyan PDM jel, amikor a felfutó élek mindig ugyanannyi időnként következnek be, állandó a frekvenciája. A két jel közt 0 és 100% -os kitöltés mellett nincs különbség. A jelszintek átlagával van kapcsolatban az analóg jel, így a modulált jel közvetlenül ráköthető egy analóg alul áteresztő szűrőre, ezzel visszakapva az eredeti analóg jelet.



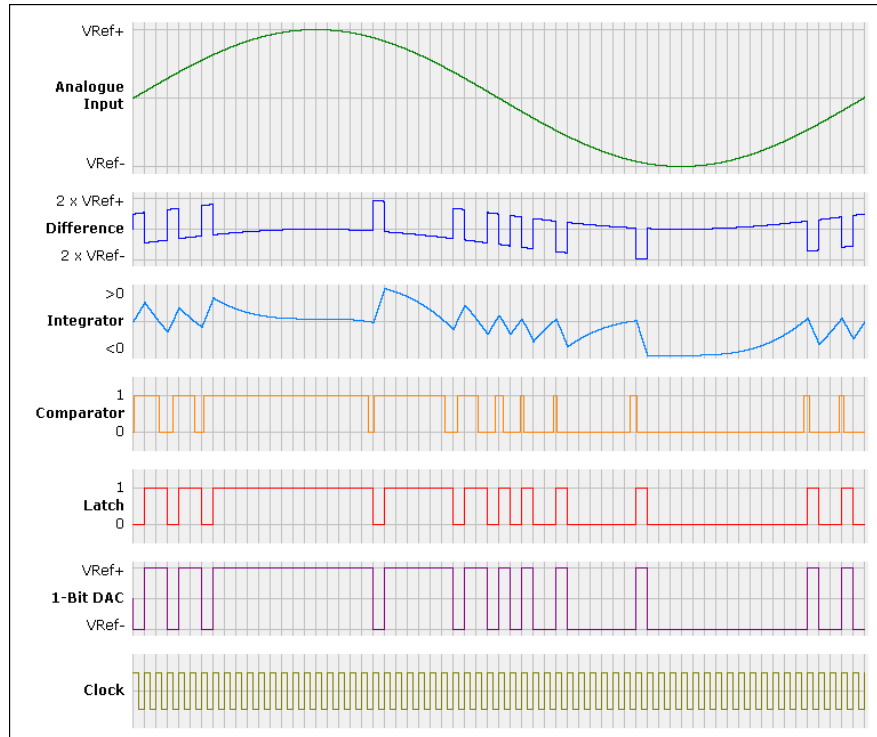
Sigma-Delta modulátor

Működését röviden

összefoglalva: A bemenő jelet integrálva rákötjük egy 1 bites ADC (komparátorra).

Amikor 0-átmenet történik akkor a bemenő jelből kivonunk vagy hozzáadunk egy V_{ref} nagyságú impulzust. (1 bites DAC)

Az ADC kimenetén található a digitális jel.



Demoduláció:

A demoduláció alapvetően egy digitális aluláteresztő szűrővel és egy decimátorral valósítható meg. Az aluláteresztővel csináljuk meg a PDM – PCM konverziót, majd a Decimátorral lecsökkentjük a mintavételi frekvenciát.

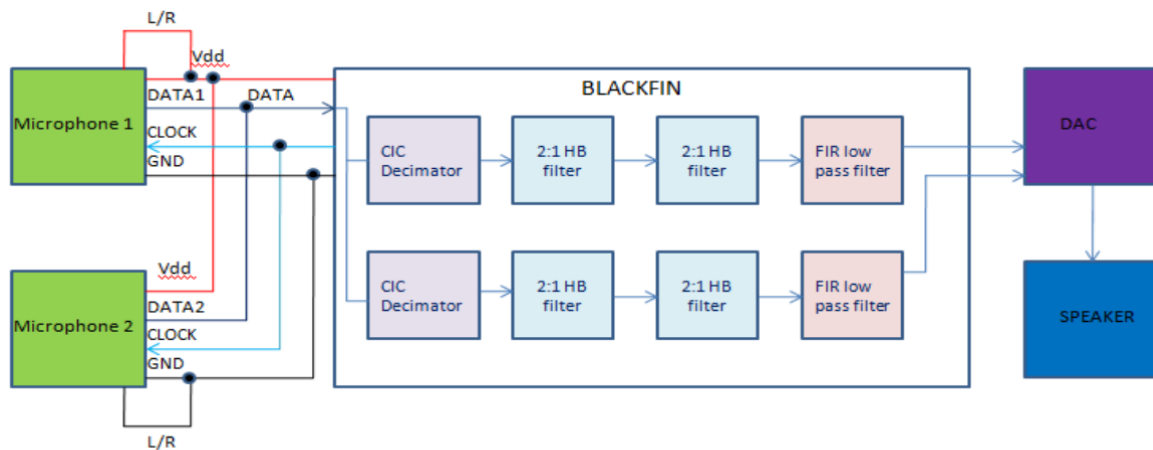


Figure 3. Interfacing two MEMS microphones to a Blackfin processor

Erre itt látható egy DSP-vel megvalósított struktúra.

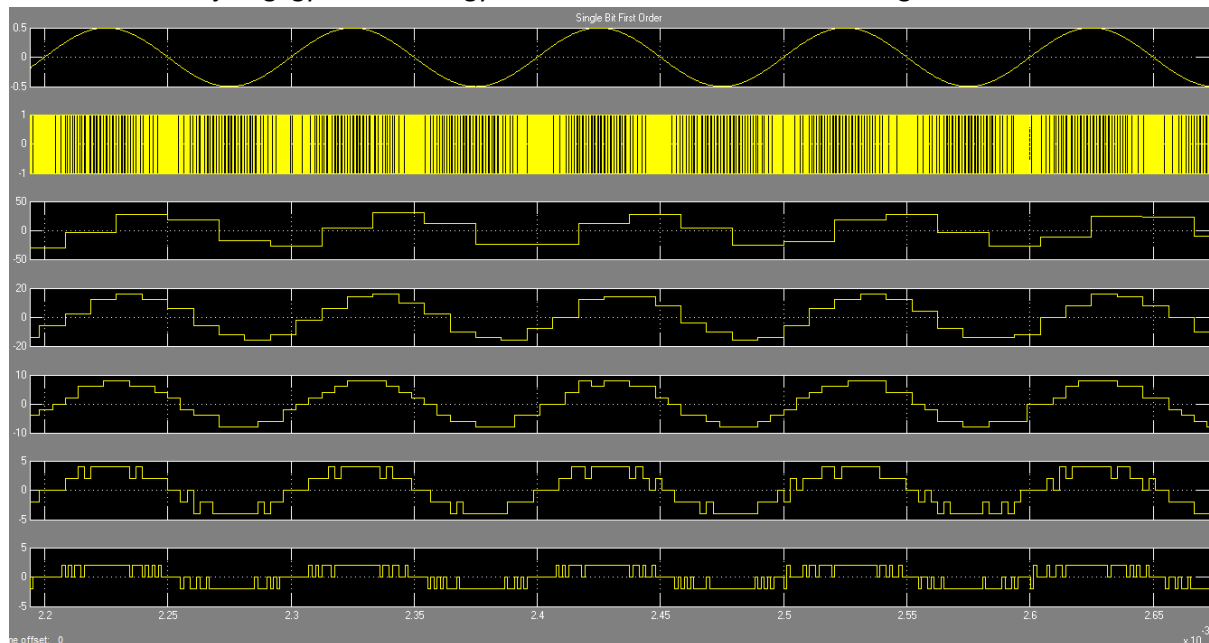
A struktúrában látható a CIC szűrő, ami megvalósítja a demodulálást és utána 2db félsáv- és egy FIR szűrő, ami utószűrést végez a nagyobb pontosság érdekében.

A PDM jelből kinyerhető információ.

Fontos foglalkozni a jelből kinyerhető információ mennyiségével. Belátható, hogy minél hosszabb időre átlagoljuk a PDM jelet, annál pontosabb amplitúdó érték lesz elérhető számunkra. Cserébe viszont a mintavételi frekvenciánk le fog csökkenni.

Amennyiben összehasonlítjuk a 3Mhz-es 1 bites PDM jelet egy 1MHz-es 16 bites ADC-vel, akkor azonnal érezhetjük, hogy kevesebb információ fog rendelkezésünkre állni.

Ennek szimulációja legegyszerűbben egy matlab szimulink szimulációval végezhető el.

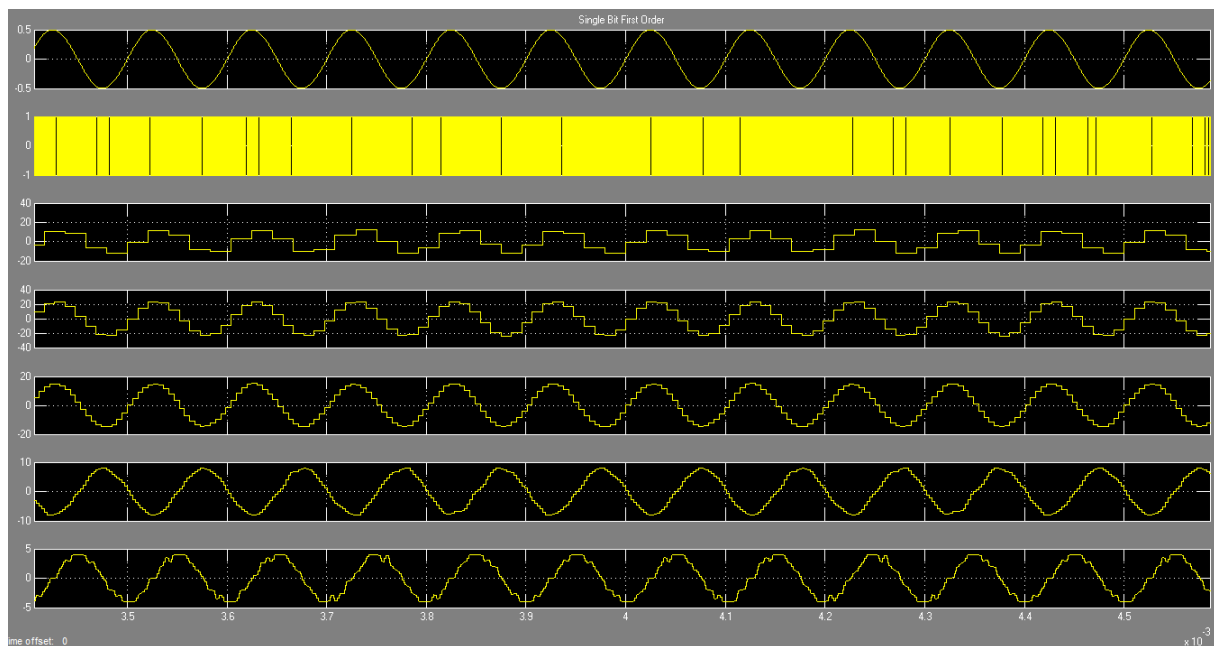


Az ábrán legfelül a bemenetre kötött analóg jel látható, ami egy 10kHz-es szinusz jel. Alatta a PDM jel.

Ezek alatt látható az 5 db demodulált jel. fentről lefele:

- 64-es Decimálási faktor: (48kHz mintavételi frekvencia) láthatóan kb 5db minta van egy periódusban. Az amplitúdó elméletben +-64 érték.
- 32-es Decimálási faktor: (96kHz), +-32 értékkel.
- 16-os Decimálási faktor: (192kHz) +-16 értékkel.
- 8-as faktor (384kHz) +-8 érték. Itt már látható, hogy nem tud elég pontosan beállni 2 érték közé az amplitúdó ezért az „ugrál”.
- 4-es faktor (768kHz) Itt látható, hogy csak sejteni tudjuk, hogy ez egy szinusz jel.

Látható, hogy a kis mintavételi frekvencia nem célszerű, hiszen kevésbé pontosan tudunk távolságot meghatározni. Ugyanakkor, ha túl nagyra választjuk, akkor nem tudunk Zero-Crossing vagy csúcsetektáló algoritmusokat használni a pontatlan jel miatt.



A fenti problémára látható itt egy megoldás, az utánszűrés alkalmazása. Abban az esetben, ha a demodulátor után kötünk szűrőket (pontosan 2db félsáv és egy FIR szűrőt), ugyanazok a jelek láthatóak.

Látható, hogy itt már megéri nagy mintavételi frekvenciát használni.

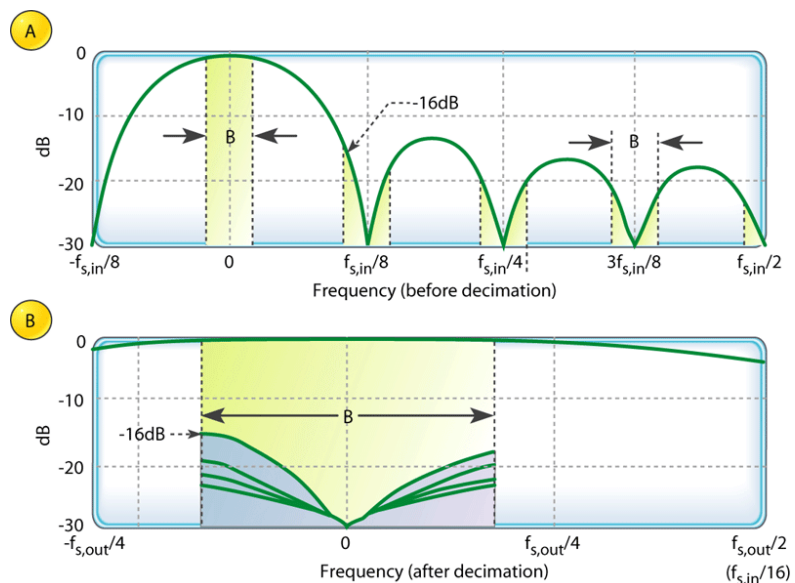
Viszont az utána kötött szűrőknek ára van: az egyik, hogy kell egy hardver, ami ezt a szűrést el is végzi. A FIR és a félsáv szűrők megvalósításához hardveres szorzás kell. A másik probléma, hogy a rendszerünknek lesz valamekkora véges készletetése, amit mi szeretnénk minimalizálni.

Az alkalmazott megoldás

A CIC decimáló szűrő

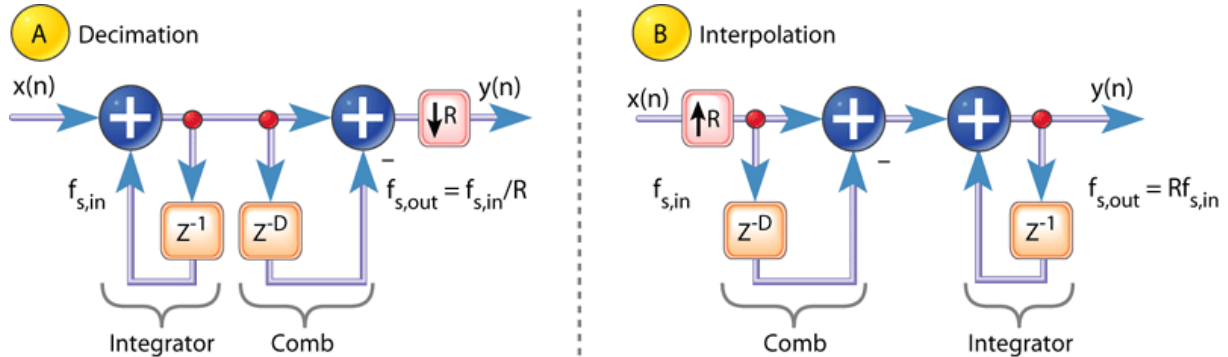
A CIC (Cascaded Integrator-Comb) szűrő egy olyan speciális szűrő, melyet kimondottan decimálásra vagy interpolálásra használnak, ugyanis az Aliasing-ból adódó torzítás mindig a szűrő elnyomási pontjaira esik, míg máshol nem olyan szigorúak a követelmények.

Ez látható a jobbra lévő ábrán is.



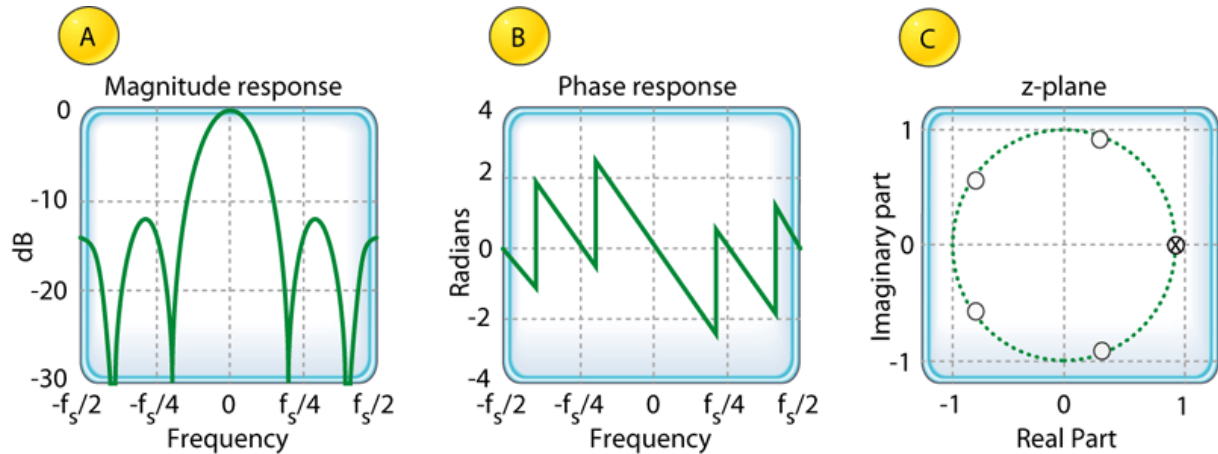
A struktúráját tekintve a szűrő 3 részből áll:

- Integrátor
- Fésű
- Decimátor (esetleg interpolátor)



Létezik olyan struktúra is, ahol a fésűk és a decimátor meg vannak cserélve, ilyenkor viszont a fésűknek nagyobb késleltetést kell adni. Ez olyan szempontból célszerű, hogy ritkábban kell összeadni, viszont ezáltal a rendszer késleltetése is megnő.

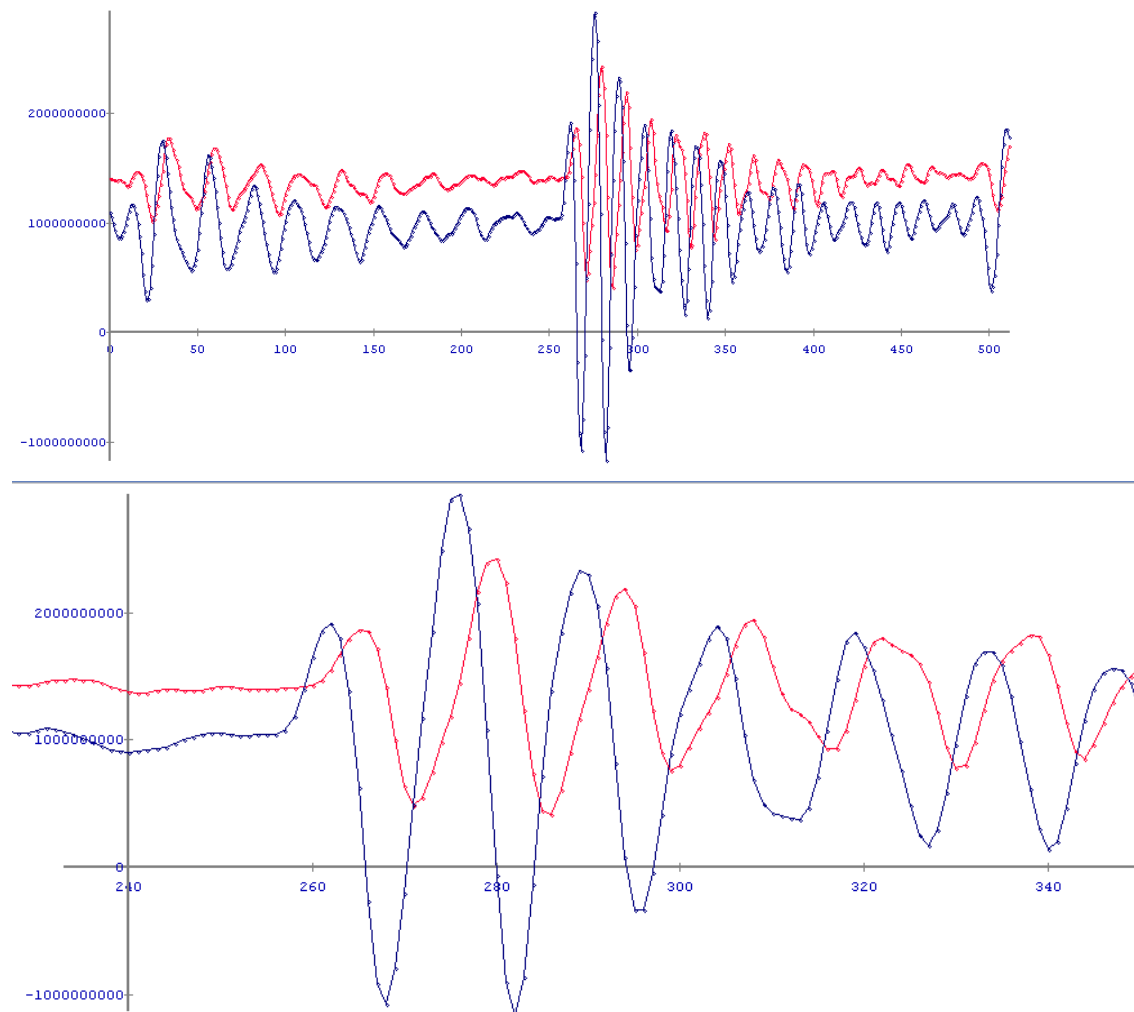
A szűrőnek egy nagyon fontos tulajdonsága, a lineáris fázismenet. Ezt biztosítanunk kell a detektáláshoz.



Tapasztalatok:

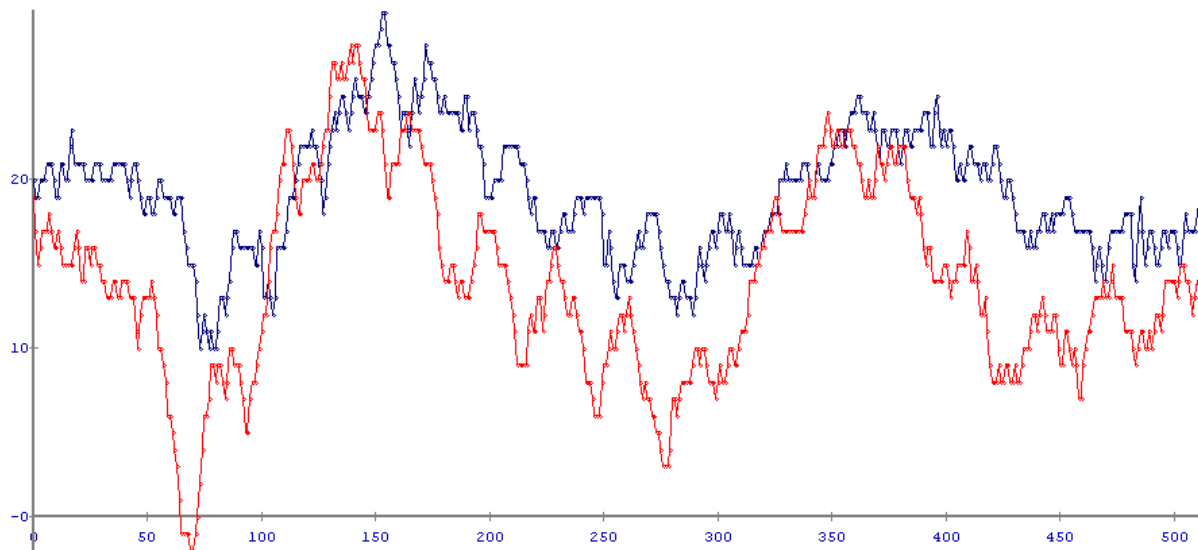
Ezt a struktúrát alkalmazva vizsgáltam a rendszert egy periodikus (négyyszög) gerjesztés mellett. 2 mikrofont alkalmazva különböző decimálási faktor mellett. (Utánszűrés nélkül)

Először 64 szeres decimálási faktor mellett.



Ilyenkor látszik, hogy a jelünk nagyon szép és pontos, látjuk, hogy a piros és kék (jobb és bal) csatorna közt egy fáziskésés van jelen. Ez az a fáziskésés, amit mi minél pontosabban szeretnénk meghatározni.

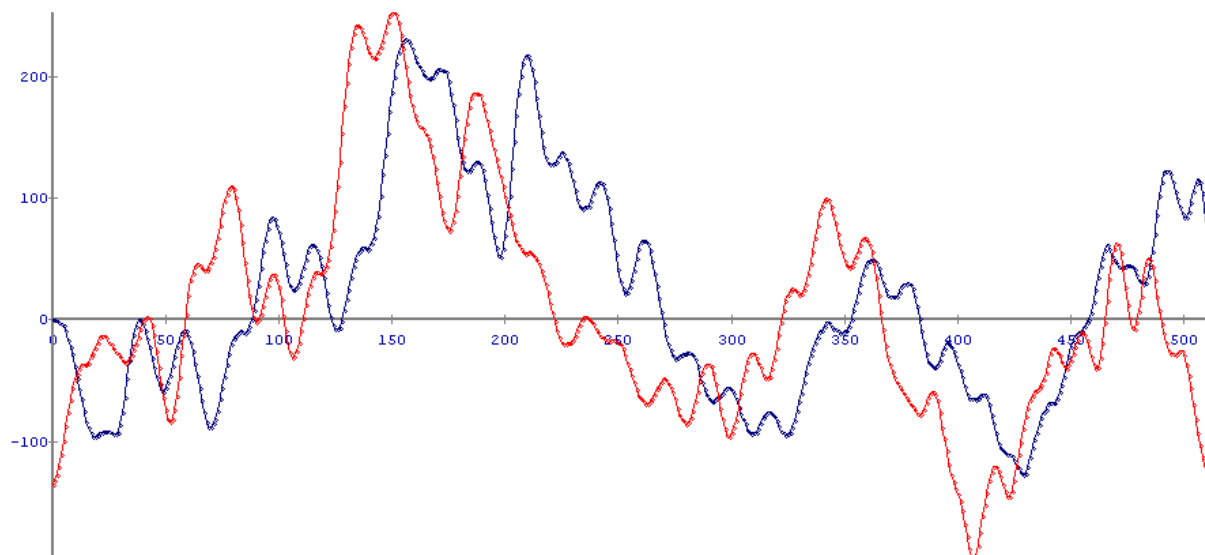
Ugyanez 8-szoros decimálás esetén.



Azt tapasztaljuk, hogy a jelalak kivehetetlen, ezt detektálásra nem lehet használni, viszont a fáziskésés még mindig jól látható. Érdekes megjegyezni, hogy ez kis légnomás amplitúdó mellett tapasztaltuk.

Jóval nagyobb amplitúdó estén, mint például taps vagy kalapácsütés ez a probléma nem állt fenn ilyen jelentősen.

Ugyanaz a struktúra csupán a gerjesztést megváltoztatva:



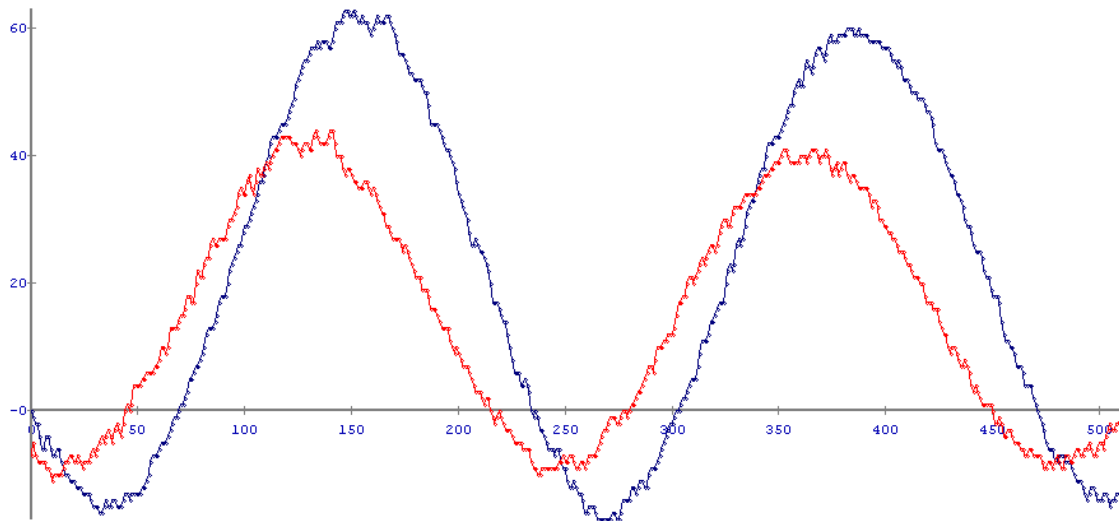
Jól látható, hogy az előző probléma egyáltalán nem jelentős. Érdekes megnézni az amplitúdókat. Az első esetben a jel csúcstól csúcsig 30 érték nagyságú, amíg a második esetben ez 350 fölötti érték. Ekkora amplitúdó mellett már nem jelentős a hiba.

Ezek oka a PDM jelnél említett információsűrűség. 8-as decimálás mellett elméletben 16 értelmes értékünk lehet, az azon fölül bitek zajosak. A CIC szűrőnek van alul áteresztő jellege, emiatt is

láthatunk 4 bitnél többet. Természetesen ezt a pontosságot tovább is lehetne növelni még több szűrő alkalmazásával.

Ofszet probléma:

Ezek a MEMS szenzorok légnyomást mérnek. Sajnos a gyártástechnológiai pontatlanságok miatt a szenzorok kimenetén valamekkora konstans ofszet található, ez már a szenzorból kiadott PDM jelen is látszik oszcilloszkóppal megvizsgálva, és sajnos ez mikrofononként változik. Ez látható az alábbi ábrán is, hogy egymáshoz képest fázisban és nullpontban is el vannak tolva a szinusz jelek.



Ennek a kiküszöbölése végett szükség van egy kalibrációra és relatív csendre. Én egy egyszerűbb megoldást alkalmaztam, ami egyszerű számtani közepe az 1024 mintának. Ezzel könnyen ki lehetett számolni egy olyan értéket, amit a jelből kivonva korrigáljuk az ofszet hibát.

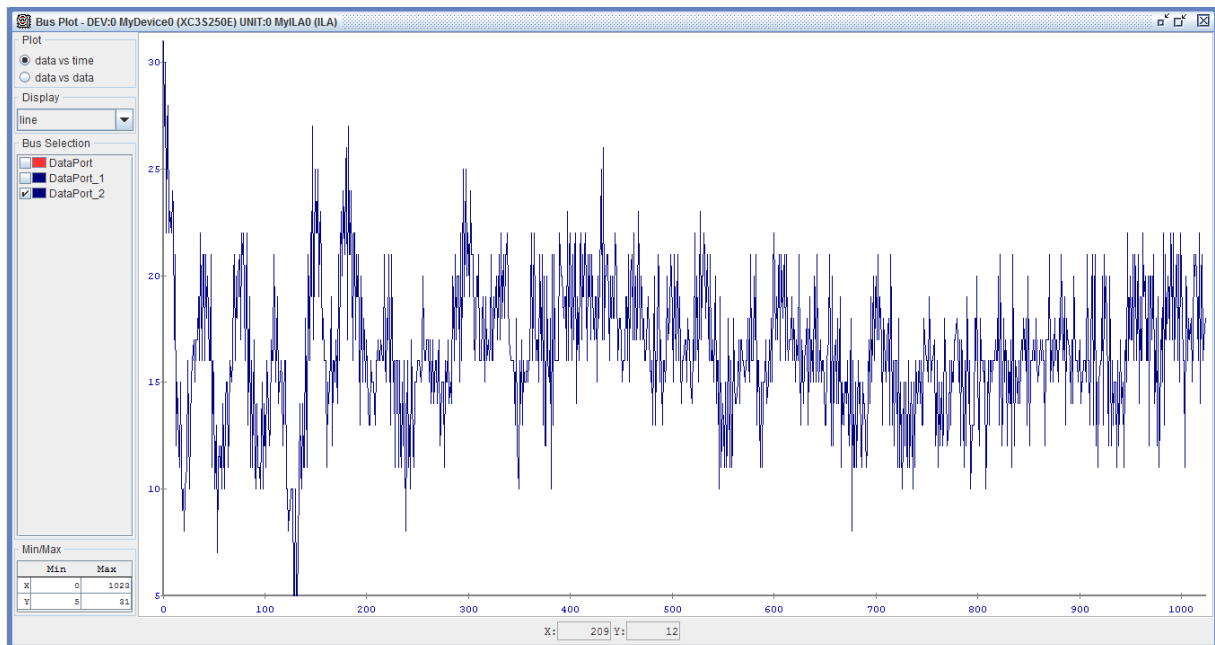
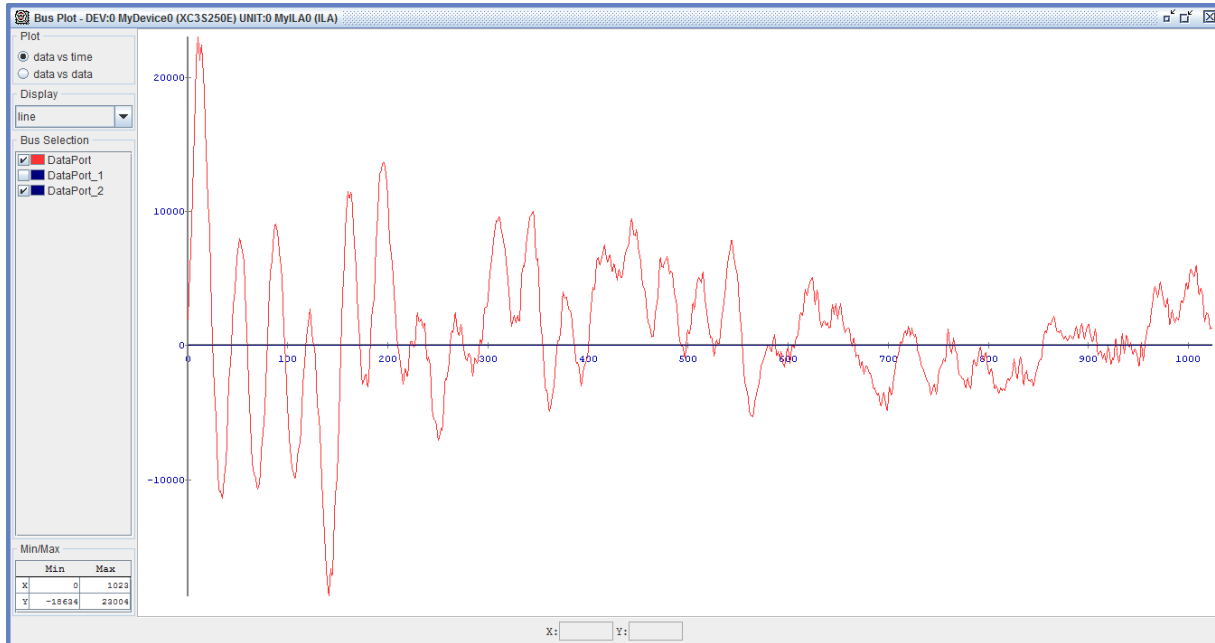
Mozgó ablakos detektálás:

A detektálás elve az, hogy közvetlen a PDM jelet minden ciklusban belevezetjük egy shift regiszter aljára, majd azt vizsgáljuk, hogy a regiszterben hány darab egyes és nulla van. Ez alapján becsülni tudjuk a jelszintet. Előnye, hogy erőforrásigénye minimális. A megoldás célja lenne csökkenteni a szűrőkből adódó késleltetést. Az idő szerinti felbontása maximális (3MHz mintavételi frekvencia).

Elméletben egy négyszög impulzust detektálni a shift regiszter méretének nagyságával arányos idő alatt tudunk detektálni. (ez az arány attól függ, hogy ismerjük e a beérkező jelalakot).

Gyakorlatban akkor tudunk normálisan jelet detektálni, ha ez a regiszter legalább 32 bit méretű.

Tapasztalatok:



Tulajdonságok:

Felső ábrán: Szűrt jel: 4-es decimálási faktor: 768kHz-es mintavételi frekvencia

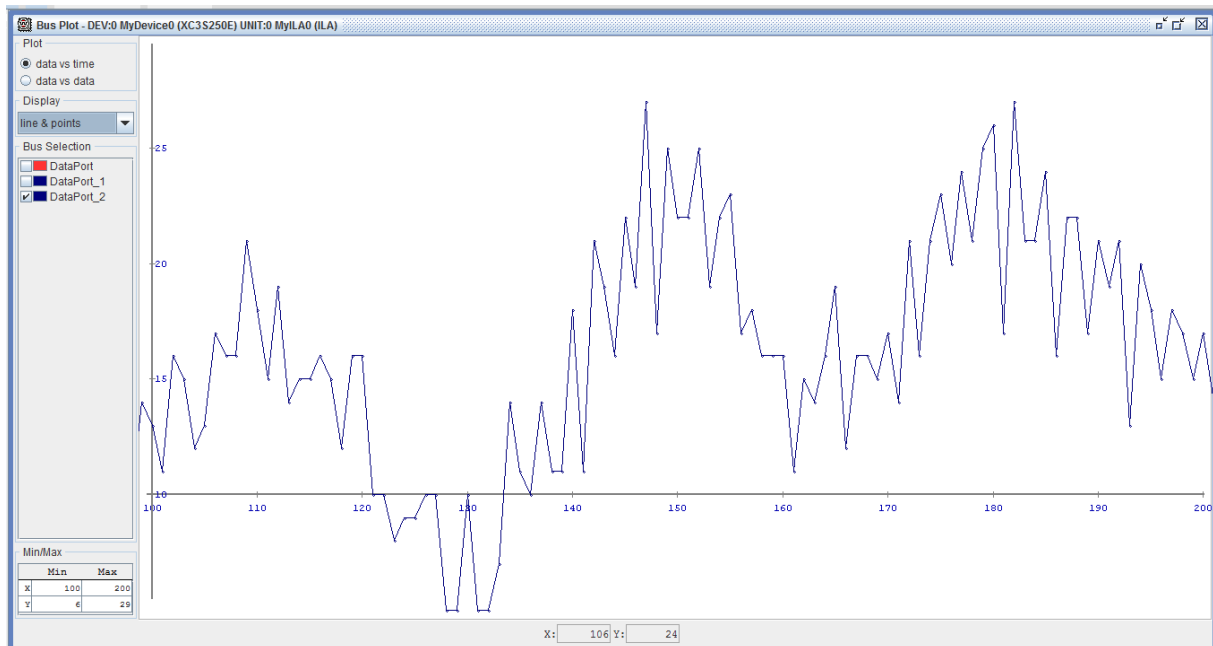
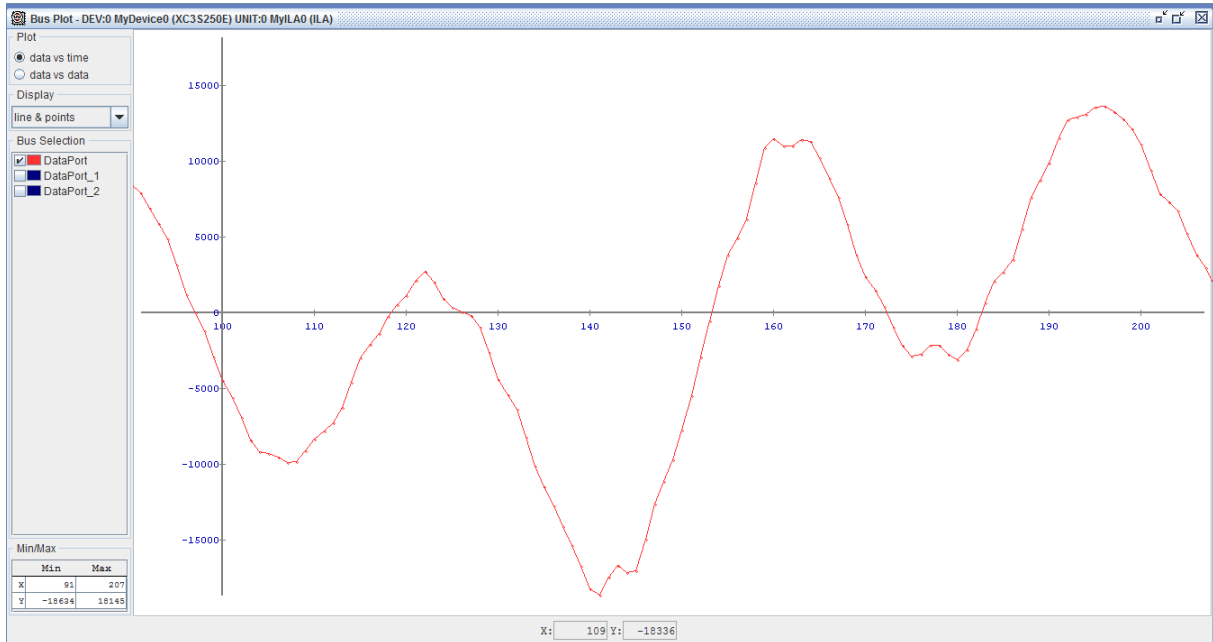
Alsó ábrán: Ablakozott jel: Alapvetően 3Mhz-enként előáll egy minta itt csak minden 4. van ábrázolva.

Az ábrákon az látható, hogy az ablakos detektálás jelalakra jól közelíti a szűrt jelet. Nullátmenet detektálásra alkalmatlan az ablakozott jel. Amire érdemben lehet alkalmazni, az csúcsetektálás.

Késleltetések:

Számunkra az is érdekes, hogy a két jel közül melyik érkezik meg hamarabb, hogyan tudnánk gyorsabban, a legkisebb késleltetéssel megmondani azt, hogy beérkezett a várt jel.

Az ábrák 100 mintára kinagyítva a lentiek.



A szűrt jelnél az alsó csúcs a 141.minta.

Az ablakozott jelnél az 1. csúcs (amiről feltehetjük, hogy a minimumot jelzi) az a 128 és 129.- minta közt szerepel. Pontosán nem tudjuk a felbontás miatt, mind x mind y tengely mentén nem pontos az ábrázolás.

Ez nagyjából megfelel a 6. rendű szűrő 12-es késleltetésének.

Irodalomjegyzék:

<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/EE-350rev1.pdf>

http://en.wikipedia.org/wiki/Delta-sigma_modulation

http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-density_modulation

<http://www.embedded.com/design/configurable-systems/4006446/Understanding-cascaded-integrator-comb-filters>

http://en.wikipedia.org/wiki/Cascaded_integrator%E2%80%93comb_filter

Mellékletek

Mellékeltem a Xilinx ISE projectfile-okat és a tesztpanelt.