



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Zajszintmérő fejlesztése

Témalaboratórium dokumentáció
2016/17. I. félév

Simonek Péter

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

Konzulens:

Dr. Orosz György adjunktus
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Tartalomjegyzék

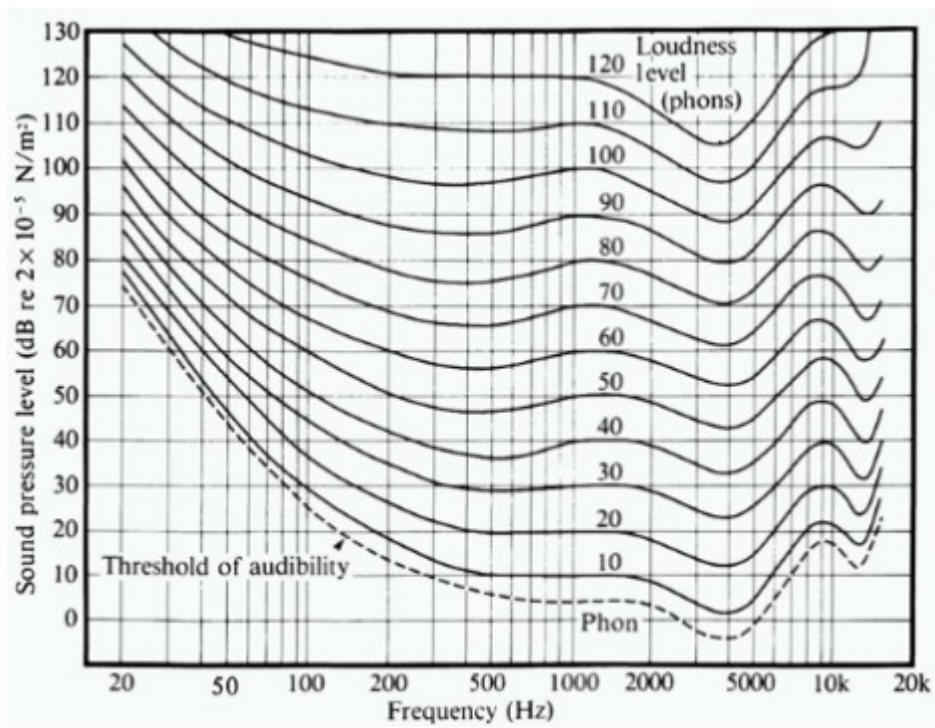
1. Bevezetés	3
2. A feladat pontosítása	4
3. Digitális szűrő tervezése	4
3.1. „A” súlyozású szűrő	4
3.2. Megvalósítási lehetőségek IIR szűrővel	5
3.3. Megvalósítási lehetőségek FIR szűrővel	6
3.4. FIR és IIR szűrős megoldások összehasonlítása	8
4. Implementáció	9
4.1. Szoftverterv	9
4.2. Rendszerterv	10
5. Tesztelés	10
5.1. Mérési eljárás	10
5.2. A kész rendszer értékelése	12
5.3. A kalibrációs eljárás értékelése	13
6. Hibaanalízis	13
Összefoglalás	14
Irodalomjegyzék	14

1. Bevezetés

A félév célkitűzése egy olyan rendszer összeállítása volt, amely képes mérni az ember által hallható hangok zajszintjét.

Fontos cél volt az eszköz megalkotásánál, hogy a mérést úgy végezze, hogy figyelembe veszi az emberi hallás egyik alapvető tulajdonságát, mi szerint az egyes frekvenciákon szóló zajokra nem ugyanolyan mértékben vagyunk érzékenyek. Ennek következménye, hogy például egy 30 Hz-es zajt jóval nagyobb teljesítménnyel kell kiadnunk ahhoz, hogy ugyanolyan hangosnak érzékeljük, mint például egy 1 kHz-es hangot. A jelenség számszerűsítésére alkalmas a „phon” mértékegység, amely a hangosságérzetet méri.

Definíció szerint egy szinuszos hang olyan hangos phonban, mint amilyen intenzitású a vele azonos hangosságérzetet keltő 1 kHz-es szinuszos hang dB-ben. Tehát 1 kHz-en a phon és dB értékek megegyeznek, más frekvenciákon viszont általában eltérnek. Az azonos phon értékekhez tartozó dB értékeket a Fletcher-Munson görbesereg ábrázolja a frekvencia függvényében (lásd 1. ábra).



1. ábra: Fletcher-Munson görbesereg

A következőkben ismertetem az általam megvalósított megoldás lépéseit, majd az elkészült rendszer mérési eredményeken alapuló értékelését.

2. A feladat pontosítása

A kész rendszernek alkalmasnak kell lennie a zajszint mérésére a bevezetésben ismertetett emberi érzékenység figyelembevételével. Ezt a hang spektrumában lévő komponensek megfelelő súlyozásával lehet véghezvinni, amelyhez egy digitális szűrőt kell tervezni.

A műszernek alkalmasnak kell lennie a zajszintmérésnél használt három szabványos mérési időtartam hosszúságú méréseket elvégeznie. Ezek az ún. impulzus-, gyors-, és lassú üzemmódok, melyek rendre 35, 125 és 1000 ms idejű mérést, majd az adott időre való effektív érték számítást jelentenek.

Értékelhető mérési eredményeket csak kalibrált műszerrel kaphatunk, így a megvalósításnál lehetőséget kell biztosítani egy kalibrációs folyamatra is.

A kiírás szerint a mérés vezérlését egy DSP kártyának kell végeznie.

Az feladat része még az összeállított mérési elrendezés tesztelése és jellemzése.

3. Digitális szűrő tervezése

3.1. „A” súlyozású szűrő

Az emberi hallás frekvencia-függőségének figyelembe vételéhez egy digitális szűrővel súlyoztam a bemenő jelet. Az erre alkalmas szűrő karakterisztikájára többféle szabványos megoldás is létezik, ezek közül a legelterjedtebb az ún. „A” súlyozású szűrő (röviden „A” szűrő), így ezt választottam.

A szűrő átviteli függvényére internetes forrásból találtam egy lehetséges megoldást, amely az alábbi:

$$H_A(s) = \frac{7.39705 \cdot 10^9 \cdot s^4}{(s+129.4)^2 + (s+676.7) + (s+4636) + (s+76655)^2}$$

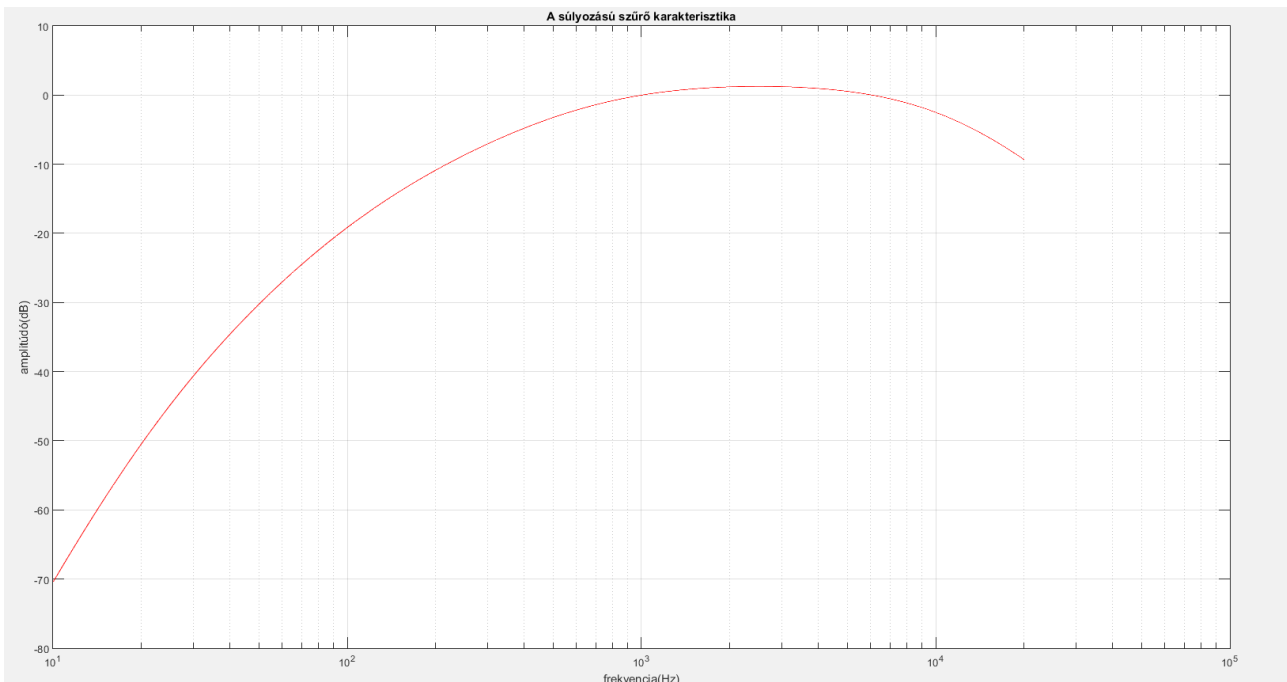
Az átviteli függvény amplitúdó karakterisztikája a 2. ábrán látható.

A fáziskarakterisztika jelen feladatban nem lényeges, hiszen az egyes hangfrekvencia-komponensek amplitúdójára van csak szükségünk a zajszint meghatározásához.

A szűrő megfelelőségének jellemzéséhez szükségem volt egy mérőszámra is, e célra a négyzetes eltérést választottam. Ezt a szűrőkarakterisztika és a referenciának tekintett $H_A(s)$ átviteli függvény amplitúdóegyütthatóinak eltéréseinek különbségére értelmeztem. Az egyes frekvenciákon (1 Hz felbontással) keletkezett eltérések négyzetét átlagoltam, majd képeztem ezek négyzetgyökét az alábbi képlet szerint:

$$h = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{f=20\text{Hz}}^{20\text{kHz}} (|H(f)| - |H_A(f)|)^2}$$

Itt $N = 20000 - 9 = 19991$, valamint $H_A(f)$ -nél az $s = 2 * \pi * f$ behelyettesítéssel éltem.



2. ábra: "A" súlyozású szűrő amplitúdó karakterisztikája

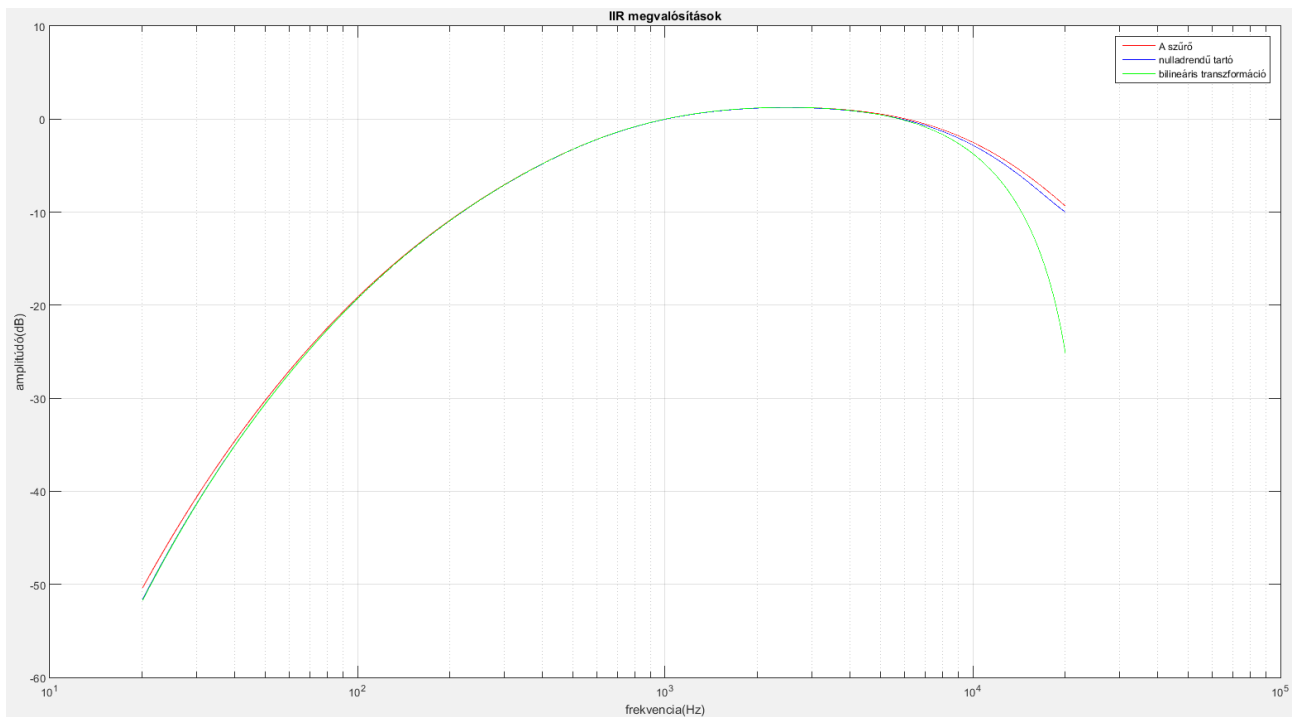
A két határfrekvencia használatát az indokolja, hogy szabvány szerint a szűrő karakterisztikája e két érték közt van definiálva.

3.2. Megvalósítási lehetőségek IIR szűrővel

Az implementálandó szűrő megvalósításának egyik lehetősége IIR szűrő használata. Ehhez a folytonos átviteli függvényt transzformálni kell a diszkrét tartományba. Munkám során kétféle eljárást vizsgáltam IIR szűrő tervezésére: a bilineáris transzformációt és a nulladrendű tartószerv (ZOH) használatát.

Mindkét esetben a MATLAB c2d függvényét használtam 'tustin' ill. 'zoh' paraméterekkel. A kapott diszkrét átviteli függvény rögtön a szűrő átviteli függvényének tekintettem.

A két lehetséges szűrőkarakterisztikának a referenciával történő összevetésénél (3. ábra) jól látható, hogy a ZOH szűrő elég jól követi a kitűzött célt, és a bilineáris transzformációval kapott is megfelelő alacsony frekvenciákon, azonban utóbbi 9 kHz felett jóval nagyobb csillapítású, mint az „A” szűrő, az emberi hallás felső határfrekvenciájának tekintett 20 kHz-en már 15 dB eltérés van köztük.



3. ábra: IIR szűrők karakterisztikái. A zöld görbén jól látható a bilineáris transzformáció hibája magas frekvencián

Ezek alapján, valamint a négyzetes eltéréssel kapott jellemző „jóság” alapján is a kettő közül a ZOH megoldás a jobb, azonban végül egyiket sem választottam, hiszen FIR szűrővel nagyságrendekkel kisebb h értéket kaptam.

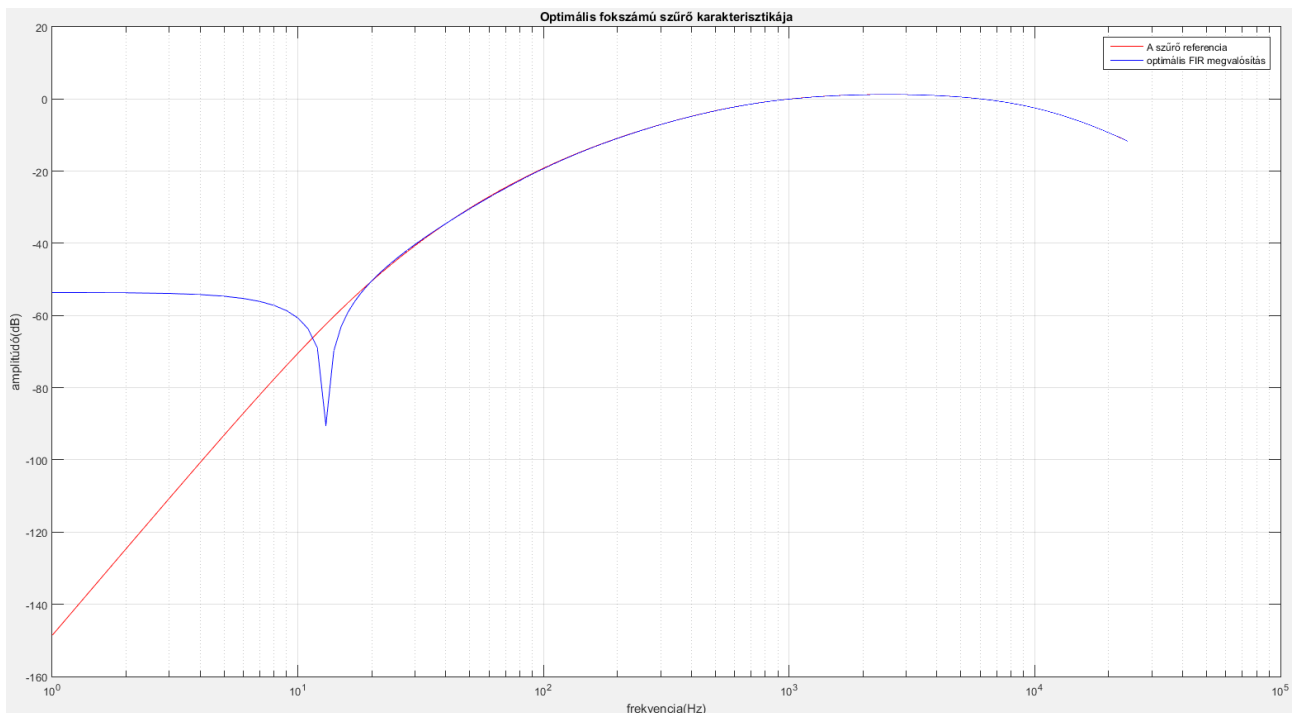
3.3. Megvalósítási lehetőségek FIR szűrővel

Digitális szűrők gyakori megvalósítása egy megfelelően sok együtthatós FIR szűrő. Esetemben az együtthatók száma viszonylag széles tartományban változhat, hiszen nagy számítási kapacitás áll rendelkezésemre (a DSP labor ADSP-21364 fejlesztőkártyáját használtam az implementáláshoz), így a tervezési eljárásnál maximum 1000 fokú szűrőig kerestem a megoldást.

A szűrőegyütthatókat a MATLAB firls függvényével számítottam, paraméterül adva neki a referencia-karakterisztika tényezőinek abszolút értékét, valamint a szűrőfokszámot. A célértékek megadásának pontos módjához (mely frekvenciákhoz tartozó értékeket, és milyen sűrűn kell megadni) tapasztalati úton jutottam. A szűrőtervezést 1-től 1000-ig minden fokszámra elvégeztem, és kerestem azt az optimális fokszámot, amelyre h értéke minimális.

Mivel így az IIR opciókhoz képest jobb pontosság-értékeket kaptam már viszonylag kis (61) szűrőfokszám esetén is, így a FIR megvalósítást választottam, hiszen ennél jóval nagyobb fokszámú szűrő is kivitelezhető, amivel már nagyságrendekkel jobb h értékeket is kaphatok. Mivel emellett döntöttem, megvizsgáltam az optimális szűrő amplitúdó-karakterisztikáját nem csak az érdekes

frekvenciákon, hanem 0 Hz-től a mintavételi frekvencia (f_s) feléig (4. ábra). Itt érdemes megjegyezni, hogy f_s értéke adott volt, a DSP ugyanis 48 kHz-el mintavételez.

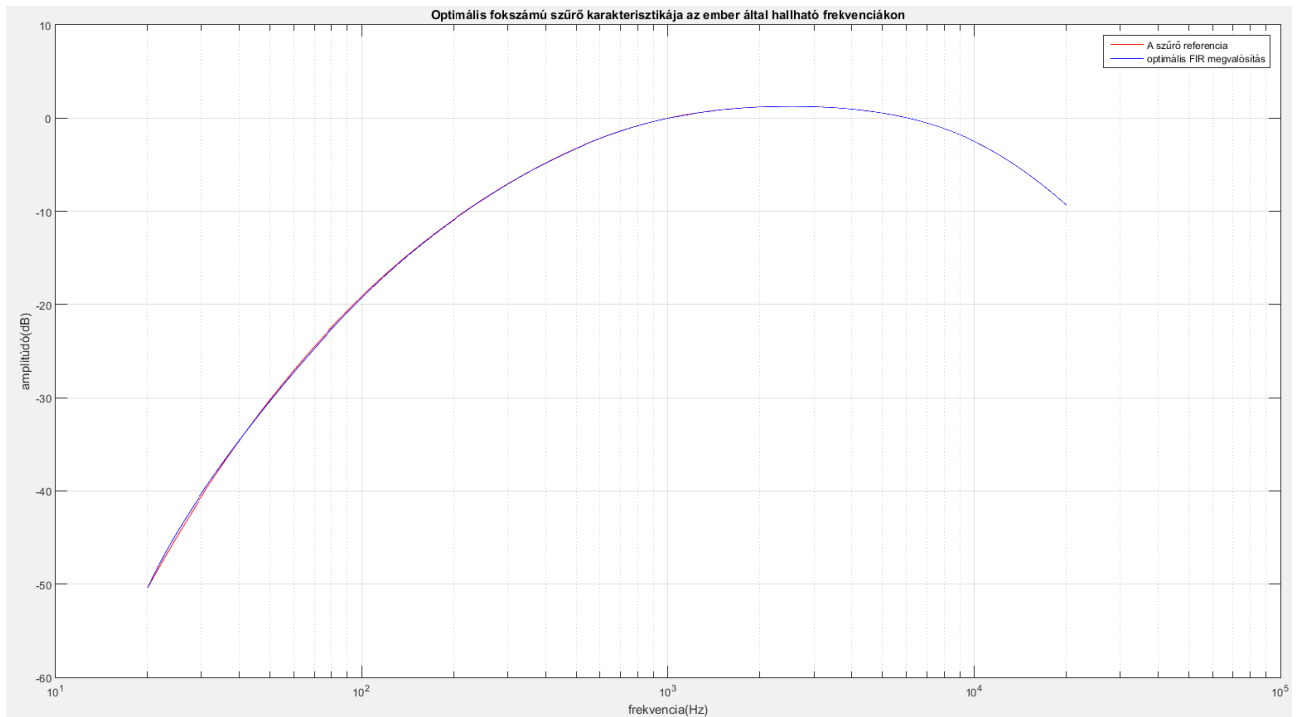


4. ábra: optimális szűrő teljes amplitúdókarakterisztikája

A mintavételezési frekvencia megfelelően nagy, hiszen a fele (24 kHz) nagyobb, mint a legnagyobb érdekes frekvencia (20 kHz). Átlapolódás szempontjából érdekes lehet még a karakterisztika ezek felett is, azonban a szűrő itt nem definiált. A tervezés során a 20-24 kHz tartományban a $H_A(s)$ átviteli függvényhez tartottam magam.

Az optimális karakterisztikán látható, hogy csak 20 Hz alatt van jelentős eltérés a $H_A(s)$ átviteli függvényből adódó értékekhez képest. Ez azonban nem fontos, hiszen itt az „A” szűrő már nincs definiálva, valamint itt már nagy elnyomás jelentkezik a szűrőn ($H \approx -50 \dots -90$ dB), így az itteni frekvenciák komponensei már nincsenek érdemi hatással a zajszintmérés eredményére. A 0 Hz-en lévő nagy elnyomás (53 dB) viszont alkalmas arra, hogy a DSP kártya esetleges offset hibáját semlegesítse.

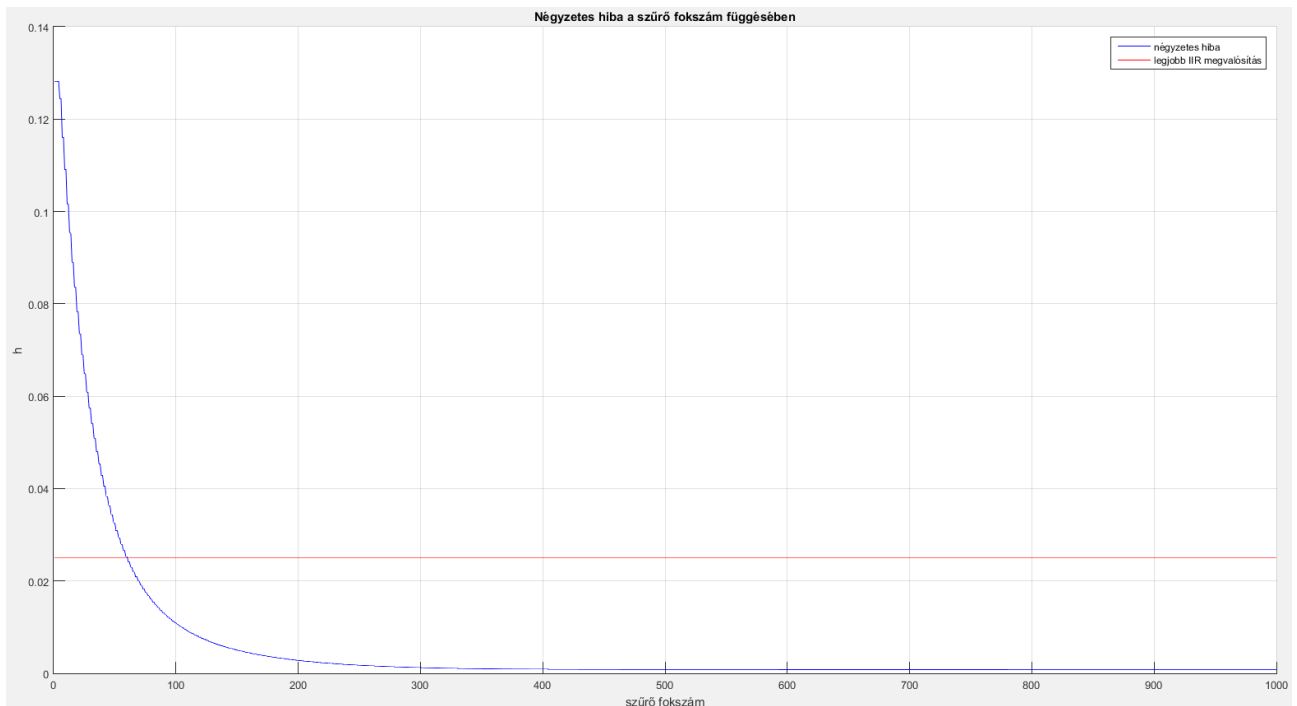
Az 5. ábrán lévő átviteli karakterisztikákon pedig az látszik, hogy a számomra érdekes frekvenciákon (20 Hz – 20 kHz) nagyon jól sikerül megvalósítani az „A” szűrőt.



5. ábra: optimális szűrő amplitúdó karakterisztikája az ember által hallható frekvenciákon

3.4. FIR és IIR szűrők megoldások összehasonlítása

A fentebb említett szűrőtervezési eljárásokat összehasonlítottam a h -ra kapott értékek alapján. Vettem az IIR megoldások közül a jobbat (ZOH), és az ehhez tartozó h -t, és egy vízszintes vonnallal (piros) feltüntettem a 6. ábrán. A kék görbe pedig a fókusz függvényében ábrázolja a FIR szűrőkhöz kapott h értékeket.



6. ábra: FIR szűrő hibája a fókusz függvényében

A grafikon alapján egyértelmű, hogy jelentős javulás érhető el FIR szűrővel az IIR-hez képest, már kb. 100 foknál is. Ugyanakkor az is igaz, hogy a hiba nem csökkenthető akármeddig, hiszen 400 fok felett jelentős szűrőfokszám-növelés esetén sem kapunk már érdemben kisebb hibát, ráadásul ránagyítva látszik, hogy a függvény nem monoton csökken, tehát nem is feltétlenül a legnagyobb fokszámhoz tartozik az optimális szűrőkarakterisztika.

4. Implementáció

4.1. Szoftverterv

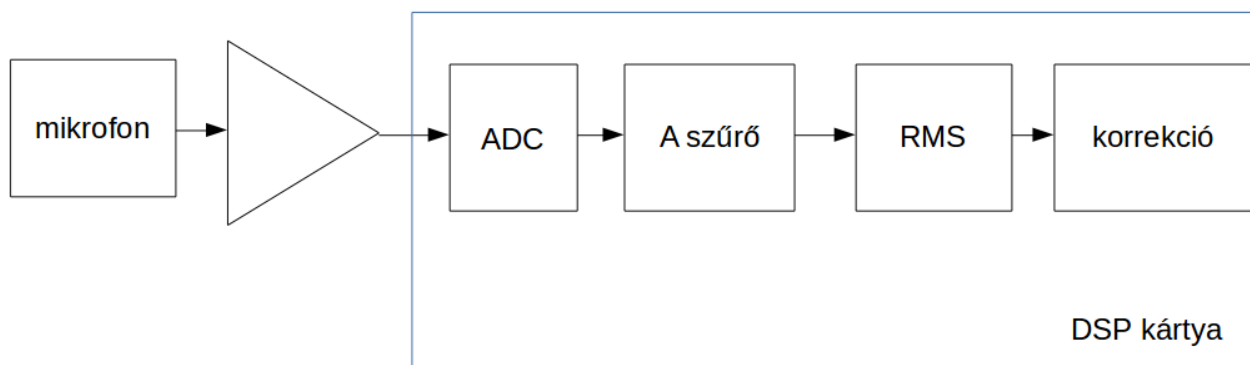
A szűrőtervezés után meg kellett valósítani egy olyan szoftvert, amellyel a DSP képes a mérési eljárást elvégezni, majd az eredmények számítása után azokat eltárolni. A programot C nyelven írtam a VisualDSP++ fejlesztőkörnyezetben, felhasználva egy már kész, szűrést megvalósító projektet.

Az implementált szoftver az alábbi funkciókkal rendelkezik:

- „A” szűrő: a bemenetre érkező mintavételezett jelet megszüri a programmemóriában tárolt szűrőegyütthatók segítségével. Ezt konvolúciós eljárással végzi, amelyhez felhasznál egy már kész assembly betétet.
- A programban egy változó átírásával állítható a három mérési üzemmód.
- A DSP kártyán egy gomb megnyomásával indítható egy kalibrációs folyamat. Ez megszakítja az éppen aktuális mérési ciklust, és indít egy újat, amely 94 dB-es jelet feltételez a bemeneten (a mérések kalibrálásánál Larson Davis CAL150 kalibrátort használtam a 94 dB-es hang előállítására). Az ADC-ből kapott, majd megszürt jel RMS értékéből és a 94 dB-hez tartozó 50118,7 számból számol egy korrekciós tényezőt, amellyel az RMS-t fel kell szorozni ahhoz, hogy helyes értéket kapjunk. Ezt a tényezőt a program eltárolja.
- RMS számítás a megszürt jelből, majd ennek felszorozása a korrekciós tényezővel, továbbá ennek dB-beli értékének számítása.
- A kapott zajszintet DSP belső memóriájában eltárolja egy tömbben, ezek a fejlesztőkörnyezet segítségével olvashatók ki.
- A DSP a kártyán felvillan egy LED-et, amely jelzi, ha a bemenetre érkező jel 95%-nál jobban kivezérli az analóg-digitális átalakítót. Erre a jelzésre szükség van, hiszen túlvezérlés esetén téves eredményeket kapunk.

4.2. Rendszerterv

A mérési elrendezés a 7. ábrán látható.



7. ábra: mérési elrendezés

A hangot egy Behringer ECM-8000 mikrofonnal alakítottam a DSP kártya számára könnyen feldolgozható villamos feszültségjellé. Mivel ennek jelszintje nagyon kicsi, ezért egy OneWay RTO3-as erősítővel 46 dB-t erősítettem rajta, hogy kihasználjam az kártya ADC-jének mérési tartományát. Az erősített jelet a DSP mintavételezi 48 kHz-cel, ezután végrehajtja rajta az „A” szűrést. A szűrt jelből már lehet a mérési üzemmódnak megfelelő hosszúságú időintervallumra RMS értéket számítani, majd ezt még korrekcióba kell venni. Az ábrán az ADC utáni blokkokat természetesen a fentebb már részletezett szoftver végzi.

5. Tesztelés

5.1. Mérési eljárás

Az eszköz tesztelésekor egy Genelec 8040A hangszóró és egy Agilent 33220A típusú függvénygenerátor segítségével különböző típusú zajokat keltettem a laborban, majd ezek zajszintjét mértem a fent ismertetett rendszerrel. A műszer mérési pontosságának jellemzéséhez szükség volt a pontos zajszint ismeretéhez, ezt egy Voltcraft SL-400-as referenciának tekintett műszerrel mértem.

A tesztelést kétféle jeltípussal végeztem: 1 kHz-es szinusszal és fehér zajjal. Sajnos a mérés során nem lehetett tisztán csak a fenti két jelleget mutató zajokat kelteni, ugyanis az épület alapzaja, valamint a számítógép ventilátora ezt nem tették lehetővé, azonban jó közelítéssel ezeket a zajokat tudtam mérni.

A mérésnél ügyeltem arra is, hogy a saját és a referencia műszer mikrofonjai egymáshoz közel helyezkedjenek el, így kiküszöbölve a zajforrástól való távolságfüggést.

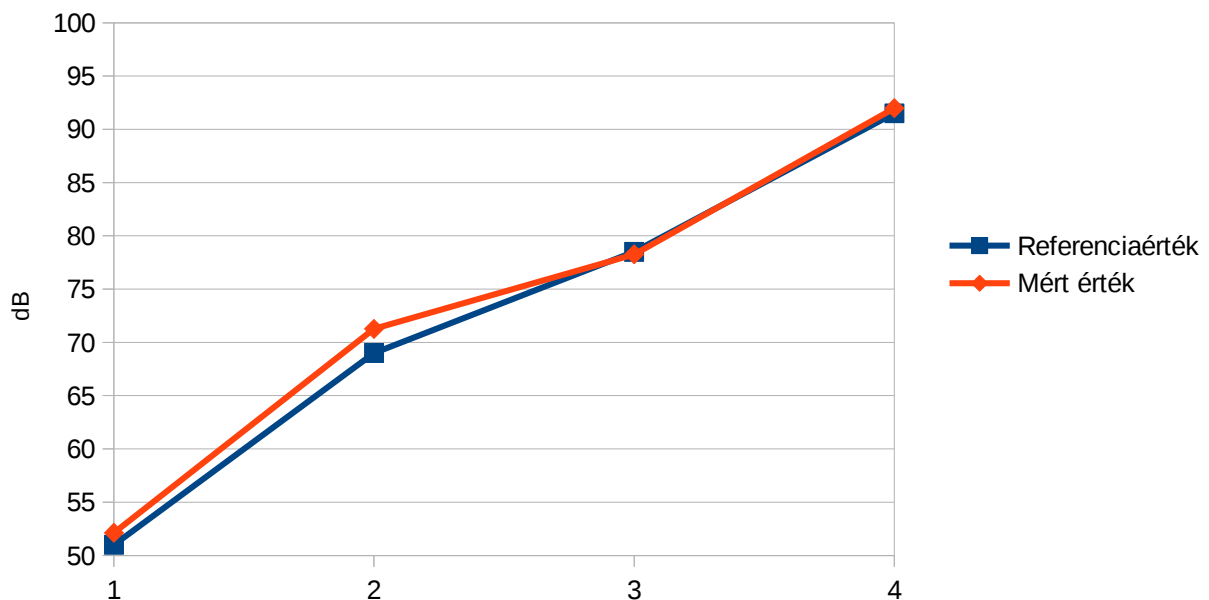


a mikrofon és a referenciaműszer elhelyezése

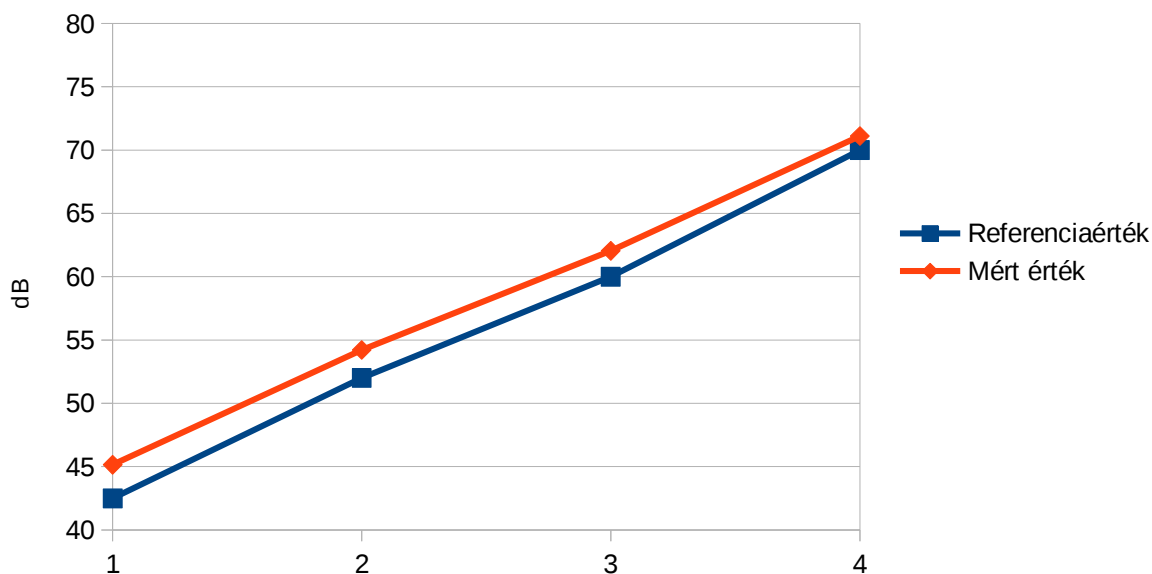
A mérés során figyeltem a referenciaműszer által mutatott értéket, majd azt a végén feljegyeztem, így összehasonlíthatóvá vált a saját rendszerem által mért értékekkel. Nagyszámú mérést (100 érték) végeztem egyhuzamban, miközben törekedtem arra, hogy a teremben állandó zajszintet biztosítsak. A méréseket mind gyors üzemmódban végeztem.

Mérési eredmények az egyes méréseknél (a referenciaértékek megfigyelés alapján adódtak, ugyanis nem volt lehetőség lementeni őket, a mért érték a 100 mérési eredmény átlagaként született):

1kHz szinuszos zaj mérése



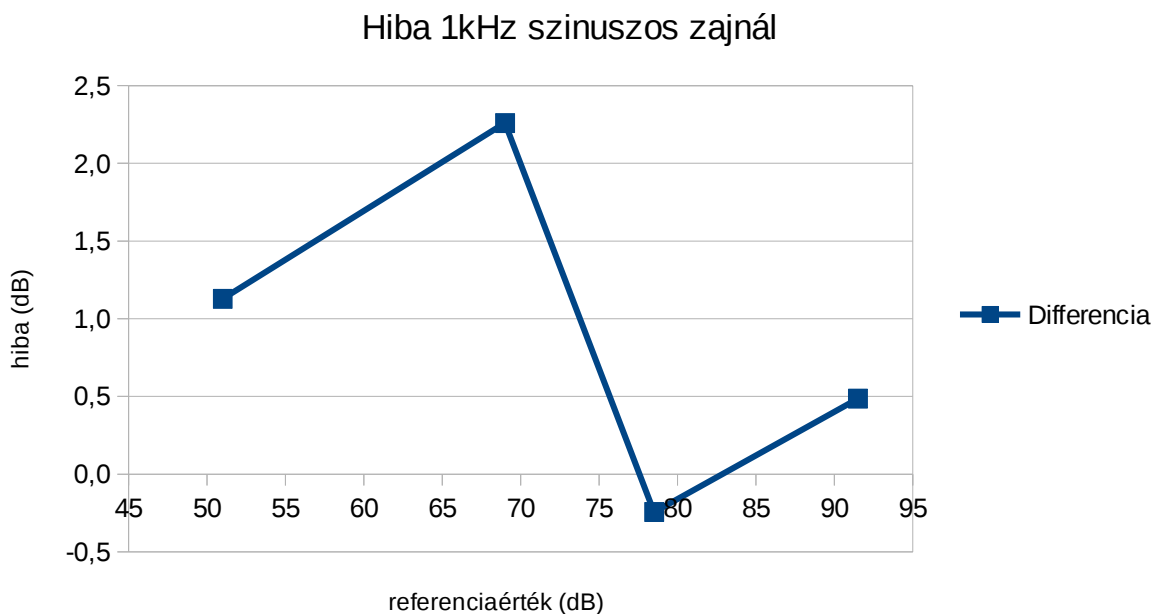
Fehér zaj mérése

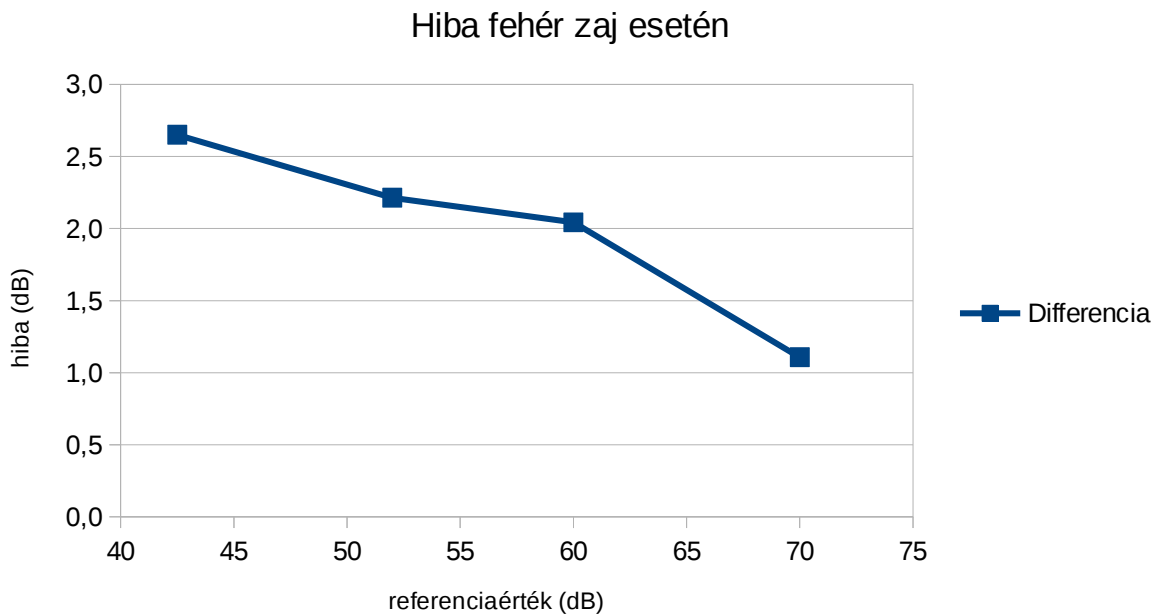


A mérési eljárás jellemzésénél meg kell említeni, hogy hibát okozott a referenciaműszer „kézi” leolvasása, hiszen a mérés során nem volt teljesen állandó az általa mutatott zajszint. Azonban a műszer jellemzéséhez itt ez is elégséges pontosságot biztosít.

5.2. A kész rendszer értékelése

A műszer jellemzéséhez ábrázoltam a referenciaértéktől való eltérést (a hibát) annak függvényében.





A hibafüggvényekből látható, hogy a mérési elrendezésemre a fölmérés a jellemző nagy általánosságban, továbbá, hogy a hiba abszolút értéke a valós zajszint növekedésével inkább csökken. Ez főleg fehér zajnál látszik jól. A hiba azonban mindig 3 dB-en belül marad, így megállapítható, hogy a műszer alkalmas a zajszint hozzávetőleges mérésére, azonban precíziós mérésekre nem.

5.3. A kalibrációs eljárás értékelése

A kalibrációs eljárás jellemzéséhez elvégeztem 10 egymás utáni kalibrációt, majd az ezekkel kapott korrekciós tényezőket átszámoltam dB-be, és kiszámoltam ezek szórását. Ezt gyors és lassú üzemmódban is megtettem. Ezekre rendre 0,045 és 0,038 dB-t kaptam, így megállapítható, hogy a kalibrációs eljárás szórása 0,1 dB-en belül marad, tehát kellően pontosnak tekinthető.

6. Hibaanalízis

A hiba okának feltárását két lehetséges hibaforrásnál vizsgáltam.

Az első a DSP kártya alapzaja. Ezt úgy mértem, hogy a kártya bemenetére nem kötöttem rá a mikrofon erősített jelét, hanem egy 1 k Ω -os ellenállással lezártam és így indítottam egy mérési ciklust. Az eredmény egyértelműen kizárja ezt a forrást, ugyanis így „üresen járva” a zajszint átlagosan csupán 0,8 dB, ezzel 50 dB-es zajszinten 50,03 dB-t mérnénk, ami messze elmarad a mért 1-3 dB-es hibától.

Emellett megvizsgáltam az erősítő tápból becsatolt zaját is, hiszen jelentősen, 46 dB-lel erősítjük a jelet, ha ez az erősítő alapzajára is igaz, akkor az magyarázhatná a hibát. Az erősítőt a

tápfeszültséggel ellátva, ugyanakkor a +48VPhantom funkciót kikapcsolva mikrofon nélkül 14 dB zajszintet mértem. Ez 50 dB-nél a jelre adva 50,13 dB eredményt kapunk, így ez sem magyarázza teljesen a hibát.

A hiba nagy részét kitevő okot tehát nem sikerült megtalálni, így az eszköz további mélyebb hibaanalízise célszerű. Ez egy jó továbbfejlesztési lehetőség is egyben. A fentiekben túli lehetőségek a hiba forrására, melyek vizsgálata indokolt lehet: a mikrofon, az erősítő +48VPhantom funkciója, valamint a szűrőkarakterisztika, ugyanis elképzelhető, hogy 20 kHz felett a referenciaműszer szűrőjének elnyomása jelentős, míg az általam számítotté csupán nagyjából 10 dB , és ez fölmérést okozhat.

Összefoglalás

A munkám során tehát első lépésként egy megadott folytonos átviteli függvényre terveztem egy digitális FIR szűrőt, amely a feladatkiírás szerinti módon súlyozza a hang egyes frekvencia-komponenseit. Ennek keretében végrehajtottam két IIR szűrőtervezési eljárást is, amelyekkel számszerűen összevetve a FIR realizálás jellemzőit, az utóbbi mellett döntöttem. Kerestem továbbá a legoptimálisabban illeszkedő karakterisztikát a foksám függvényében.

Egy már létező szoftverből kiindulva megalkottam a mérési eljárást futtató programot a labor DSP kártyájához. Ezután a rendelkezésre álló eszközökből (mikrofon, erősítő, DSP kártya) összeállítottam a mérési elrendezést, amelyet kétféle zajtípussal teszteltem.

A mérési eredményeket összevetettem egy referenciaműszerével, majd a jelentkező eltérések okát is megpróbáltam felkutatni.

Összesített értékelésként megállapítható, hogy az eszköz alkalmas a kitűzött célok végrehajtására, azonban precíziós mérésekre még nem használható.

A projekt továbbfejlesztésének lehetőségei közt mindenképpen megemlítendő a kibővített hibaanalízis, amellyel, és a szükséges beavatkozásokkal a mérési eredmények további pontosítása remélhető. Emellett lehetőség van további használt, de nem annyira elterjedt szűrőkarakterisztikák implementálására is.

Irodalomjegyzék

A Wikipedia „A” súlyozású szűrőről szóló angol nyelvű cikke:

<https://en.wikipedia.org/wiki/A-weighting>

Egy másik, „A” szűrőről szóló internetes cikk:

<http://www.sengpielaudio.com/calculator-dba-spl.htm>

A Fletcher-Munson görbesereg forrása:

<https://blogs.msdn.microsoft.com/audiofool/2007/02/07/louder-sounds-better/>