



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**  
Villamosmérnöki és Informatikai Kar  
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Szarvas Attila

**EGYÉNI AKTÍV  
ZAJCSÖKKENTÉS ÚJSZERŰ  
MEGKÖZELÍTÉSSEN**

KONZULENS

**Dr. Sujbert László**

BUDAPEST, 2011

# Tartalomjegyzék

<b>Összefoglaló .....</b>	<b>5</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>6</b>
<b>Előszó .....</b>	<b>7</b>
<b>1. Elméleti áttekintés.....</b>	<b>9</b>
1.1. Az aktív zajcsökkentés alap gondolata .....	9
1.2. A jelfeldolgozási feladat leírása.....	11
1.2.1. Az előrecsatolt struktúra .....	11
1.2.2. Adaptív szűrők.....	12
1.3. Az NFXLMS algoritmus .....	14
1.3.1. Az LMS algoritmus .....	14
1.3.2. Az FXLMS algoritmus .....	15
1.3.3. A bátorsági tényező normalizálása .....	16
<b>2. Kereskedelmi forgalomban lévő egyéni aktív zajcsökkentő eszközök.....</b>	<b>17</b>
2.1. Piaci áttekintés .....	17
2.2. Alsó kategóriás fejhallgatók tesztje .....	18
2.2.1. A mérési elrendezés .....	18
2.2.2. Zajelnyomás szinuszos zavarok esetén.....	20
2.2.3. Zajelnyomás sztochasztikus zavarok esetén .....	23
2.2.4. Személyes tapasztalatok .....	24
<b>3. A nyílt kialakítás akusztikai vizsgálata.....</b>	<b>26</b>
3.1. Számítógépes szimulációk .....	27
3.1.1. A szimulációs program ismertetése .....	27
3.1.2. Különböző elrendezések elnyomási terének vizsgálata.....	29
3.2. Hangszóró iránykarakterisztikájának mérése .....	36
3.3. Kísérletileg létrehozott elnyomási tér feltérképezése .....	37
3.4. A zajelnyomás érvényesülése zárt csőben .....	39
<b>4. A zajcsökkentő eszköz fizikai kialakítása.....</b>	<b>41</b>
4.1. Az elrendezés ismertetése .....	41
4.2. Az alkatrészek ismertetése .....	42
<b>5. Az NFXLMS algoritmus gyakorlati megvalósítása .....</b>	<b>47</b>
5.1. Hardveres megvalósítás .....	47

5.1.1. ADSP-2126x.....	47
5.1.2. AD73322.....	48
5.2. Szoftveres implementáció.....	48
<b>6. Az eszköz paramétereinek működésre gyakorolt hatása .....</b>	<b>52</b>
6.1. A referenciajel vételezése .....	52
6.2. A mintavételi frekvencia.....	57
<b>7. Az optimális elrendezés jellemzőinek mérése.....</b>	<b>58</b>
7.1. Zajelnyomás szinuszos zajokra.....	58
7.2. Zajelnyomás sztochasztikus zajokra .....	59
7.3. A felhasználói élmény szubjektív értékelése .....	59
7.4. A rendszer fogyasztása .....	59
<b>Összefoglalás, kitekintés .....</b>	<b>61</b>
<b>Irodalomjegyzék.....</b>	<b>63</b>
<b>Függelék.....</b>	<b>64</b>
Matlab program a 3. fejezet szimulációinak elvégzéséhez.....	64

# HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott **Szarvas Attila**, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy autentikált felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Kelt: Budapest, 2011. 12. 08.

.....  
Szarvas Attila

# Összefoglaló

A dolgozatban a hordozható zajcsökkentő eszközök működésével, kialakításával és felhasználási lehetőségeivel foglalkozom. Bemutatom egy újszerű, nyitott kialakítással rendelkező eszköz tervezésének és megvalósításának a menetét. Ismertetem a sajátos feltételekből adódó akusztikai- és jelfeldolgozási problémákat, és javaslatot teszek a megoldásukra.

Az aktív zajcsökkentés alap gondolata, hogy elektronikus eszközök felhasználásával létrehozzuk a kioltandó zaj ellentettjét, mely az elnyomási pontban interferálva a zajjal kioltja azt. A digitális jelfeldolgozásra épülő megoldások általában az FxLMS algoritmus valamely változatát használják.

Az egyéni zajcsökkentő eszközök kínálatát jelenleg 20 – 120 ezer Ft közötti analóg rendszerű fejhallgatók képezik. Méréseim alapján az alsó kategóriás modellek periodikus zajok esetén 10, sztochasztikus zavarok esetén 5 dBA elnyomásra képesek szűk frekvenciatartományban. A fül környékére kifejtett nyomás miatt a fejhallgatók hosszú távú viselése kényelmetlen lehet. Nyílt kialakítással az eszközök ergonomikusabbá tehetők, így azonban eddig részletesebben nem vizsgált akusztikai problémák merülnek fel. Számítógépes szimulációk segítségével megvizsgáltam a kisméretű zajcsökkentő elrendezések elnyomási terét. A hangszórók terének négyzetes intenzitáscsökkenése miatt az elnyomási sáv egy keskeny körgyűrűre korlátozódik. Az eredményt gyakorlati mérésekkel igazoltam.

Az elnyomási mező jellegének figyelembe vételével és egy munkavédelmi sisak felhasználásával kialakítottam egy két hangszórót, két zajmikrofont és egy referenciamikrofont tartalmazó nyitott zajcsökkentési elrendezést. Az elnyomást egy DSP fejlesztőkörnyezeten futtatott, NFxLMS algoritmust felhasználó, előrecsatolt struktúrával valósítottam meg. Kísérletek sorozatával megkerestem az elrendezés optimális működését biztosító paramétereket. Megvizsgáltam a referenciamikrofon helyzetének, a keresztutak elhanyagolásának és a mintavételi frekvenciának a hatását.

Az eszköz végleges változata a sisakhoz rögzített referenciamikrofonnal működik. Periodikus zajok esetén 10 dBA feletti elnyomást biztosít széles frekvenciatartományban, sztochasztikus zajok esetén 5 dBA elnyomásra képes.

A megjelölt továbbfejlesztési irányokkal a berendezés egy szelektív zajelnyomást biztosító, széles körben alkalmazható munkavédelmi eszközzé válhat.

## **Abstract**

This thesis covers the working principles, design aspects and usage possibilities of portable noise cancelling devices. It proposes a novel, acoustically open design. It reviews the acoustic and signal processing problems arising from the special environmental conditions and offers appropriate solutions.

The general principle of active noise cancelling is to generate anti-noise using electronic equipment that will interfere with the noise at a given location and thus eliminate it. Solutions utilizing digital signal processing are usually based upon some variation of the FxLMS algorithm. Personal noise cancelling devices in Hungary range from \$90 to \$500 and come in the form of headphones. According to my measurements the low end ANC headphones can achieve 10 dBA suppression of periodic noises and 5 dBA of stochastic noises in a narrow frequency band. Wearing headphones over a sustained period can become uncomfortable due to the pressure exerted around the ears. The ergonomic qualities of such devices can be enhanced by using an open design, but that introduces acoustic problems not studied in depth before. I have created computer simulations displaying the suppression field of small-sized noise cancelling designs. The suppression region is limited to a narrow ring around the speakers. The results have been confirmed by practical measurements. Accommodating to these results I have created an open design using one speaker and one noise microphone next to each ear and one reference microphone for the whole system. These devices have been attached to a construction helmet. Noise cancelling has been realized by a DSP developer environment running NFxLMS algorithm in a feedforward structure.

Executing a set of measurements I have identified the optimal parameters for the system. I have measured the efficiency of noise cancelling with different sampling frequencies, different reference microphone positions, and cross-paths taken into account or being neglected.

The final configuration of the noise cancelling device has a reference microphone fixed on the construction helmet itself. It is capable of 10 dBA suppression of periodic noises in a wide frequency band and 5 dBA suppression of stochastic noises.

I have identified the necessary development steps to enable the device to successfully provide noise cancelling among industrial conditions.

## Előszó

Az aktív zajcsökkentés napjainkra széles körben elterjedt technológiává vált, amely a speciális igényeket kielégítő épületgépészeti megoldásoktól az olcsó zenei fejhallgatókig számos helyen megtalálható.

Kivitel szerint megkülönböztethetünk lokális és hordozható, másként egyéni zajcsökkentő eszközöket.

Az első kategóriába tartoznak a repülőgépek utaskabinjában vagy a koncerttermek légkondicionáló csatornáiban elhelyezett eszközök. Ezek egy kis kiterjedésű, állandó berendezésű térben hoznak létre kioltást védve az ott tartózkodókat. Működésük nem terjed ki egyenletesen minden térrészre és feltételezi a rendeltetésszerű körülményeket. A légkondicionáló csatornája például egy két végén nyitott, üres csőnek tekinthető, amely jelentősen leegyszerűsíti a megoldandó akusztikai feladatot. A repülőgép utasfülkéjében pedig feltételezzük, hogy az utasok helyüket elfoglalva töltik az utat, így a zajcsökkentés is az ülések fölött, fejmagasságban valósul meg leginkább.

A feltételezett körülmények teljesülése esetén a lokális zajcsökkentés a felhasználók számára észrevétlenül, kényelmük megzavarása nélkül működik.

Az egyéni aktív zajcsökkentő eszközöket jelenleg az ilyen funkcióval ellátott fejhallgatók és fülhallgatók jelentik. Viselésük az előbbi kategóriához képest jelent némi kényelmetlenséget, ugyanakkor teljesítményük és rugalmasságuk felülmúlja a lokális megoldásokét. Lehetővé teszik, hogy viselőjük szabadon mozogjon, miközben változatlan teljesítménnyel biztosítják számára a zajelnyomást. A fülre szorosan rásimuló fejhallgatók és a hallójáratba helyezhető fülmonitorok működésében egyaránt jelentős szerepet játszik a passzív hangszigetelés. Az esetek jelentős részében ez nem jelent problémát, ugyanakkor kiváltásával két szempontból is előrelépést érhetünk el.

Egy nyitott kialakítású, egyéni aktív zajcsökkentő eszközzel javítható a felhasználók komfortérzete. A fül környékére állandó nyomást kifejtő fejhallgatók hosszantartó viselete gyakran irritációval, zavaró fájdalommal jár. A szakdolgozatban bemutatott eszköz a fej egészére felfekvő, a fül környéki részekkel egyáltalán nem érintkező kialakítással rendelkezik.

A másik szempont elsősorban munkavédelmi eszközöknél érvényesülhet. A zajjal terhelt munkakörnyezetben viselt passzív eszközök a káros zajokkal azonos

mértékben csillapítják az emberi hangot, vagy az esetleges figyelmeztető jelzéseket is. Az aktív eszközöknél ugyanakkor a referenciajel és a működési paraméterek megfelelő megválasztásával lehetőség van arra, hogy a károsnak ítélt zajokat úgy csillapítsuk, hogy a dolgozók közötti kommunikációt a legkisebb mértékben sem akadályozzuk.

A szakdolgozat elsődleges célja tehát az eddigieknél kényelmesebb, intelligensebb zajvédelmi megoldás létrehozása, és a feladat megvalósításával kapcsolatos szempontok alapos körüljárása.



# 1. Elméleti áttekintés

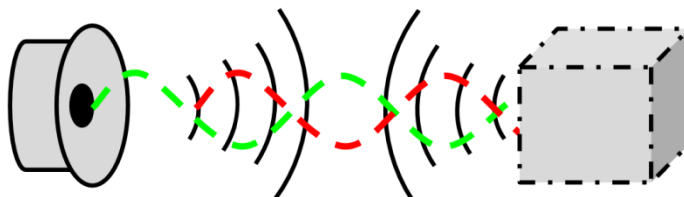
## 1.1. Az aktív zajcsökkentés alapgondolata

Az iparosodott, modernizált környezetekben mindennapos probléma az akusztikus zajok jelenléte. A hanghullámok terjedéséhez a legtöbb anyag megfelelő közegül szolgál, így a passzív zajvédelemhez – különösen az alacsony frekvenciák tartományában – bonyolult struktúrákra és vastag, nagytömegű hangszigetelő rétegekre van szükség. A hagyományos hangszigetelési megoldások költségesek és csak behatárolt, helyhez kötött terüken képesek megóvni az embereket a külső hangforrásoktól.

Az aktív zajcsökkentési megoldások nagyszerűen teljesítenek az alacsony frekvenciatartományban, ahol tömegük és költségük az azonos hatás eléréséhez szükséges passzív hangszigetelésének töredéke. Ráadásul kialakíthatók hordozható elrendezésben is, így képesek folyamatosan védeni egy személyt, miközben nem korlátozzák mozgási szabadságát.

Az első aktív eszközt helikopterekben alkalmazták, ahol a pilóták fejhallgatója segítségével nyomták el a rotor zaját. Manapság már sokféle elrendezésben használnak aktív zajcsökkentést, de praktikus voltának köszönhetően a fejhallgatókba integrált változatok még ma is dominánsak a piacon.

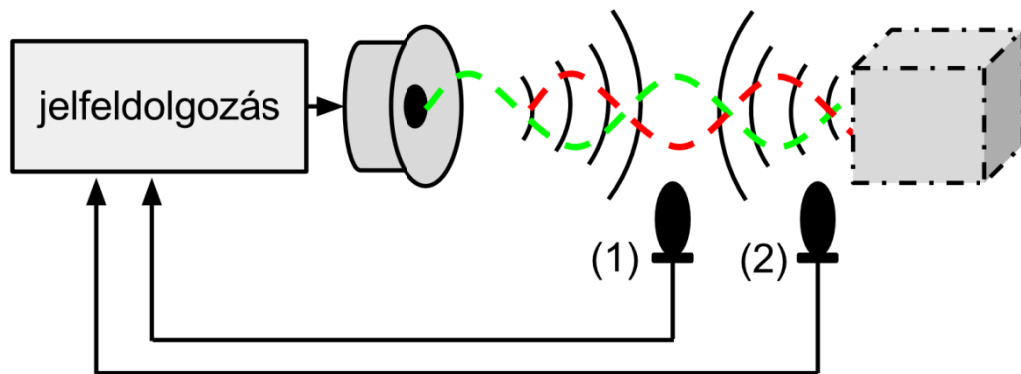
Az aktív zajcsökkentés alapgondolata a következő: oltsuk ki a tér egy adott pontjában a zajt oly módon, hogy egy hangszóró segítségével a zajjal azonos, de ellenkező előjelű hanghullámokat bocsátunk ki. Az 1.1. ábrán látható módon a kibocsátott hullámok az eredeti zajjal interferálva kioltják azt.



1.1. ábra – Az aktív zajcsökkentés alapgondolata

A probléma gyakorlati megvalósításának nehézsége abban rejlik, hogy a beérkező zajt „meg kell jósolni”, hiszen a terjedéshez szükséges idő miatt még az előtt elő kell állítani, hogy a kioltás helyszínén érzékelhetnénk.

Az aktív zajcsökkentés két jellemző struktúrája a *visszacsatolt (feedback)* és az *előreccsatolt (feedforward) struktúra*. Az előbbi a kioltás helyén tapasztalható zajból, az elnyomási rendszer által tapasztalt hibából, az utóbbi pedig egy ettől eltérő forrásból származó *referenciajelből* állítja elő a kioltáshoz szükséges ellenzajt. Az előreccsatolt struktúra elméletileg képes zérus hibával működni, azaz a zajt teljes egészében elnyomni, sztochasztikus zajok ellen pedig csak ezzel tudunk hatékonyan fellépni. [4] A dolgozat témájául szolgáló eszköz fejlesztése során ezért csak ezzel a struktúrával foglalkoztam, és a továbbiakban csak ennek tárgyalására szorítkozom.



1.2. ábra – Zajelnyomás előreccsatolt struktúrával

Az 1.2. ábrán bemutatott előreccsatolt elrendezésnél a *zajmikrofon* (1) által érzékelt hibajel segítségével olyan módon állítjuk be a jelfeldolgozó egység paramétereit, hogy az a *referenciamikrofon* (2) által érzékelt jelből éppen a kioltandó zaj ellentettjét állítsa elő. A referenciajelnek nem kell feltétlenül mikrofonból származnia, az ezzel kapcsolatos szempontokat a későbbiekben mutatom be. Kauzális rendszer esetén sztochasztikus zajok elnyomására nyilvánvalóan csak akkor van lehetőség, ha a referenciajel időben megelőzi a hozzá tartozó zajt.

Bár az elrendezés a kialakításból adódóan csak a zajmikrofon helyén garantálja a zajok minimalizálását, a gyakorlatban jelentős elnyomás tapasztalható annak  $\lambda/4$  sugarú környezetében, ahol  $\lambda$  a csillapítandó zaj adott komponensének hullámhossza. Egy 300 Hz-es hangot például kb. 30 cm-es környezetben megfelelően ki lehet oltani.

A zajelnyomáshoz tartozó jelfeldolgozási feladatot analóg és digitális eszközökkel is meg lehet valósítani, a dolgozatban ismertetett megoldás digitális eszközöket és eljárásokat használ.

A *beavatkozók* (hangszórók), zajmikrofonok és referenciamikrofonok elhelyezésére, valamint a jelfeldolgozó egység jellemzőire vonatkozó követelményeket a berendezés kialakítása, a környezet és a zaj jellege is befolyásolja. Például a fixen rögzített és a hordozható (egyéni) berendezéseknek különböző követelményeknek kell eleget tenniük. Ezeknek a tényezőknek a hatását a következő fejezetekben fogom részletesen bemutatni.

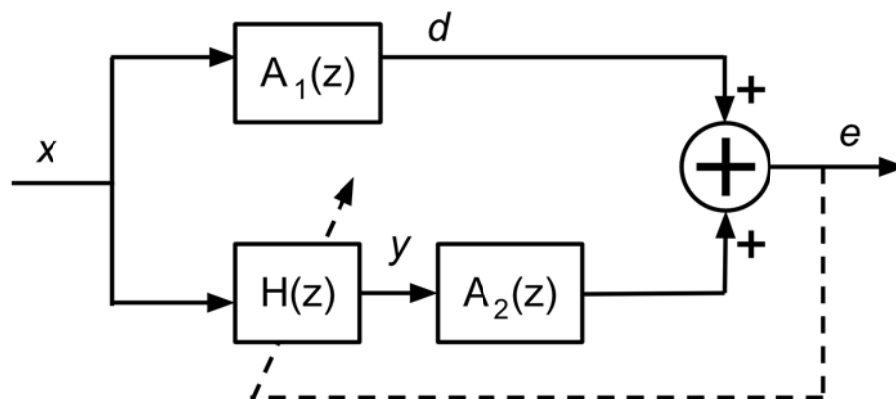
## 1.2. A jelfeldolgozási feladat leírása

A gyakorlatban a zajelnyomási feladatot vissza- és előreccsatolt struktúrákkal valósítják meg. Az akusztikus alkalmazások túlnyomó többségénél az előreccsatolt struktúra előnyeiből adódóan egyértelműen jobb választásnak bizonyul.

A visszacsatolt rendszer esetén a hibajel nem lehet tartósan nulla, mivel ebből áll elő a beavatkozójel. Ebből következik az is, hogy sztochasztikus jelek (amelyeknek jövőbeli értékei a múltbeli értékekkel korrelálatlanok) elnyomása ezzel a struktúrával nem lehetséges. Hátrányai miatt nem foglalkoztam behatóbban a visszacsatolt struktúrával, csak az előreccsatolt struktúrát ismertetem részletesen.

### 1.2.1. Az előreccsatolt struktúra

Az elnevezés onnan származik, hogy a jelek terjedési irányához képest egy referenciajelet előreccsatolunk a rendszerben.



1.3. ábra – Az előreccsatolt struktúra

Az 1.3. ábrán látható  $x$  jel a referencijel, mely származhat egy mikrofonról (ld. 1.2. ábra (2)-es mikrofon), de származhat akár fordulatszám-lólóról (amennyiben csak a periodicitás a fontos), vagy elektronikus zajforrás esetén magából a zajkeltő eszközből.

A jobboldali összegző reprezentálja a kioltás helyszínét, ahol a zaj és az ellenzaj találkozik.  $d$  a kioltandó zaj, amely az  $A_1(z) \cdot x$  szorzatként áll elő. Ebben az esetben  $A_1(z)$  a zaj terjedési közegének átvitele a referenciamikrofon és a hibamikrofon között. Ebben a modellben  $A_2(z)$  annak a teljes útnak az átvitelét jelenti, amelyen a beavatkozójel az adaptív szűrőt követően végighalad, amíg a zajmikrofonon keresztül ismét digitális adatsor nem lesz belőle. Benne van tehát többek között a DA konverzió, a hangszóró, az átviteli közeg, a mikrofon és az AD konverzió átvitele is.

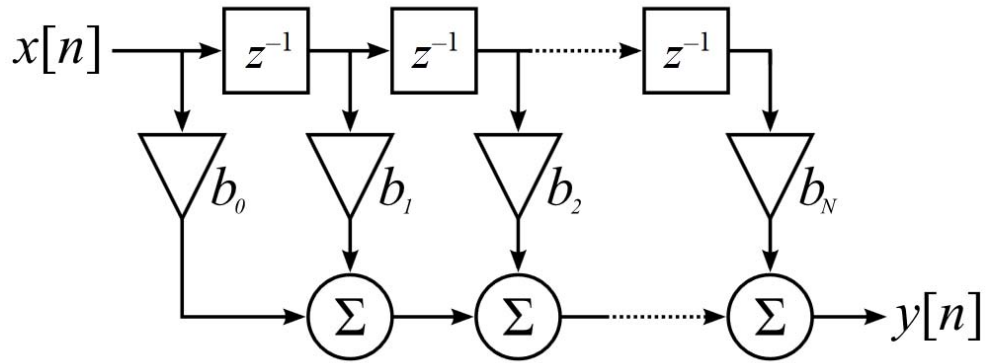
$H(z)$  a rendszer *adaptív szűrője*, melynek feladata, hogy a  $-A_1/A_2$  utat modellezze. Mivel szükség van  $A_2$  inverzére, a feladat csak akkor megoldható, ha  $A_2$  minimálfázisú. A gyakorlati mérések alapján azonban ez nem mindig teljesül, ami az eljárás hatékonyságát rontja. [1]

A bemutatott struktúrával akkor lehet sikeres zajelnyomást megvalósítani, ha a zaj ( $d$ ) és a referencijel ( $x$ ) korreláltak, vagyis létezik olyan  $F$  lineáris szűrő, hogy  $d = -F \cdot x$ . A 3. ábrán bemutatott modellben ez nyilvánvalóan teljesül, a gyakorlati megvalósításoknál azonban tudatosan arra kell törekedni, hogy a zaj- és a referencijelek közötti korreláció minél nagyobb legyen.

### 1.2.2. Adaptív szűrők

A zajcsökkentési feladatok során a modellezendő elsődleges út ( $A_1$ ) átvitele általában nem állandó. Könnyen belátható például, hogy a zajforrás közeledése esetén  $A_1$  átlagos csillapítása növekszik. A modellezési feladatokra ezért folyamatosan módosítható átvitelű, *adaptív szűrőkre* van szükségünk.

A gyakorlati alkalmazások többségében erre a feladatra *véges impulzusválaszú* ún. *FIR* szűrőket használnak. [4]



1.4. ábra –  $N$  foksámú FIR szűrő struktúrája

Az 1.4. ábrán látható szűrő bemenete és kimenete között az alábbi összefüggés áll fenn.

$$y[n] = \sum_{i=0}^N b_i x[n - i]$$

A struktúra a szűrő impulzusválaszának  $N$  elemét tartalmazza, innen származik elnevezése. A kimeneti jelet úgy állítja elő, hogy a bemeneti jelet konvolválja az impulzusválasszal.

A digitális jelfeldolgozásban használt másik gyakori szűrő a *végtelen impulzusválaszú szűrő*, angol rövidítéssel *IIR szűrő*. Ez egy visszacsatolt rendszer, amelynek stabilitására ebből adódóan oda kell figyelni, mivel a FIR szűrővel szemben képes gerjedni. Bár a FIR szűrő implementációjának nagyobb a számításigénye, garantált stabilitása miatt többnyire ezt részesítik előnyben.

Az adaptivitás lényege, hogy működés közben a szűrő együtthatóit egy kitűzött cél érdekében egy meghatározott algoritmussal folyamatosan módosítjuk. A legáltalánosabban alkalmazott algoritmus az LMS<sup>1</sup>, amely nevének megfelelően a hibanégyzet várható értékét, vagyis a zaj teljesítményét minimalizálja.

Az aktív zajcsökkentés gyakorlatában ennek továbbfejlesztett változatát alkalmazzák.

---

<sup>1</sup> least mean squares

## 1.3. Az NFxLMS algoritmus

### 1.3.1. Az LMS algoritmus

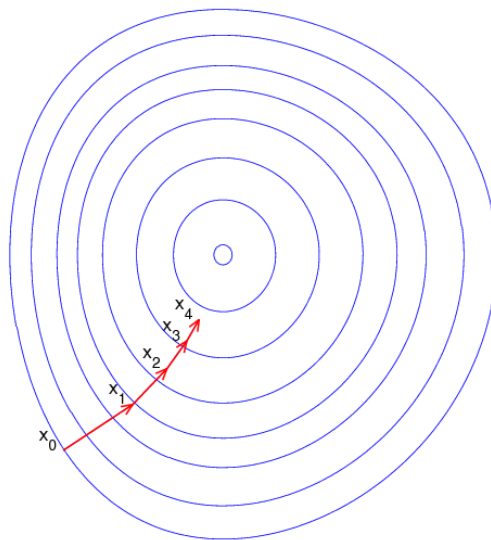
Az LMS algoritmus költségfüggvénye a hibanégyzet várható értéke, a szűrőegyütthetők adaptálásakor ennek minimalizálására törekszünk.

$$C(e[n]) = E(e[n]^2)$$

Az LMS algoritmus rekurzív képletéhez  $N$  fokú szűrő esetén csak a szűrőegyütthetők aktuális értékét, valamint a hiba- és referenciajel utolsó  $N$  elemét kell felhasználni.

$$\mathbf{h}[n + 1] = \mathbf{h}[n] + \mu \mathbf{e}[n] \mathbf{x}[n]$$

Ahol  $\mathbf{h}$  a szűrőegyütthetők vektora az  $n + 1$ -edik, illetve az  $n$ -edik ütemben,  $\mathbf{e}$  és  $\mathbf{x}$  pedig a hiba- és a referenciajel utolsó  $N$  mintájának vektora az  $n$ -edik ütemben. A képletet alkalmazva a költségfüggvény gradiens menti csökkentésének módszerét valósítjuk meg. A  $\mu$  lépésköz, vagy *bátorsági tényező* szolgál a gradiens menti haladás sebességének beállítására. Az 1.5. ábra szemlélteti a gradiens irányában történő, annak nagyságával arányos léptékű haladást.



1.5. ábra – Hibacsökkentés gradiens menti minimalizálással

Ökölszabály szerint, ha adaptív szűrőnek  $N$  fokú FIR szűrőt használunk, akkor célszerű  $\mu = 1/N$ -t választani.  $\mu$  optimális értéke, ahol a beállítás a legrövidebb idő alatt megvalósul, tapasztalati úton határozható meg. Nagyon kicsi bátorsági tényező mellett a beállítás az 1.5. ábra alapján is érzékelhető módon lassú lesz.  $\mu$  optimálisnál nagyobb

értéke esetén is lassul a beállítás, túlságosan nagy bátorsági tényező esetén az is megtörténhet, hogy a szűrőegyütthetők egyre távolabb kerülnek a hibaminimumhoz tartozó állapottól, és a szabályozási hurok instabillá válik.

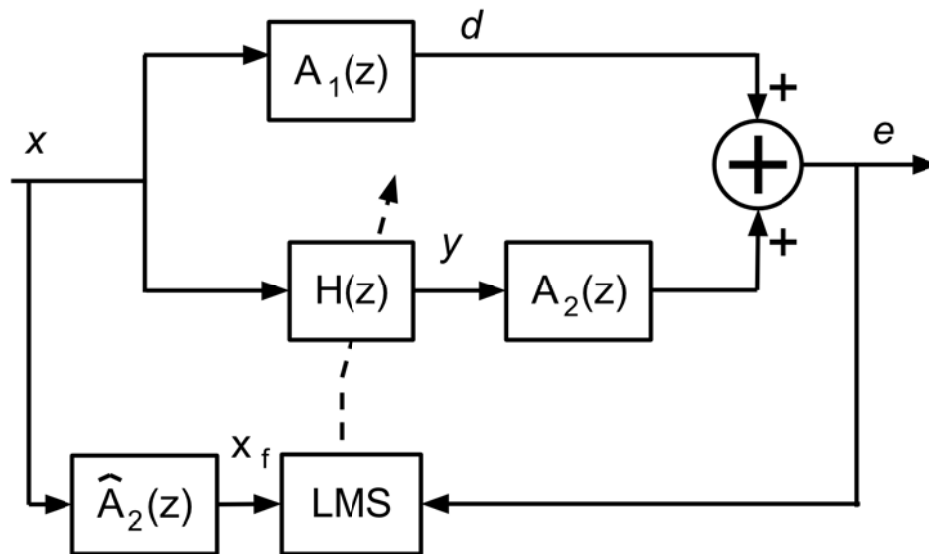
Bátorsági tényezőnek tehát egy olyan optimális értéket kell választani, ahol rövid *beállási idő* mellett is stabil marad a hurok.

Ha  $A_2$  dinamikus rendszer, akkor az LMS algoritmus általában nem stabil, ezért a gyakorlatban az FxLMS algoritmus változatait alkalmazzák. [4]

### 1.3.2. Az FxLMS algoritmus

Az Fx a *filtered auxiliary* angol kifejezés rövidítése. Az auxiliary path, vagyis kiegészítő út az 1.6. ábrán  $A_2$ -vel jelölt, másodlagos útnak felel meg.

Az LMS algoritmus a szűrő adaptálásakor nem veszi figyelembe, hogy a szűrő kimenetét nem közvetlenül csatoljuk vissza a rendszerbe, hanem a másodlagos út átvitelén keresztül. Az FxLMS algoritmus az LMS algoritmus módosított változata, amely az adaptáláshoz a referencijelnek a másodlagos átviteli út modelljével szűrt változatát használja fel.



1.6. ábra – Az FxLMS algoritmus

A gyakorlatban  $A_2(z)$ -t nem ismerjük, ezért használjuk a becslőjét,  $\hat{A}_2(z)$ -t, amelyet a másodlagos út *modellező szűrőjének* nevezünk.

Ezt szintén adaptív FIR szűrővel szokás megvalósítani, melynek szűrőegyütthetőit az üzemszerű működést megelőző identifikációs szakaszban szintén LMS algoritmus segítségével határozzuk meg. A rendszer ilyenkor maga állítja elő a

referenciajelet, a másodlagos út identifikációjához nagy sávszélességű fehérzaj alkalmazható. A rendszer a jelet kiküldi a beavatkozó hangszóróra és az LMS algoritmust alkalmazva az alábbi költségfüggvényt minimalizálja.

$$C(e[n] - x_f[n]) = E \left( (e[n] - x_f[n])^2 \right)$$

Ahol  $x_f$  a másodlagos út becselőjének átvitelével szűrt referenciajel. Az FxLMS algoritmus művelete így a következőképp adható meg.

$$\mathbf{h}[n + 1] = \mathbf{h}[n] + \mu \mathbf{e}[n] \mathbf{x}_f[n]$$

### 1.3.3. A bátorsági tényező normalizálása

Az NFxLMS elnevezés első betűje a bátorsági tényező *normalizálására* utal. Amennyiben rögzített  $\mu$  paramétert használunk, az adaptációs lépések nagyságát a hiba és a referenciajel teljesítménye fogja befolyásolni. Az alábbi a bátorsági tényező egy szokásos normalizálása. [1]

$$\mu = \frac{\alpha}{\mathbf{x}_f^T[n] \mathbf{e}[n]}$$

Ahol  $\alpha$  szabadon választott paraméter. Ily módon az algoritmus viselkedése függetleníthető a bemeneti jelek teljesítményétől.

A normalizálás hatásaként a rendszer kis bemeneti jelek esetén is gyorsan beáll, és nagy jelek esetén is stabil marad.



## **2. Kereskedelmi forgalomban lévő egyéni aktív zajcsökkentő eszközök**

### **2.1. Piaci áttekintés**

A jelenleg kapható aktív zajcsökkentő eszközök fej- vagy fülhallgató kialakításúak. Árukat és az aktív zajelnyomás minőségét tekintve széles tartományban mozognak: az alsó kategóriában 20 000 Ft körül találhatunk fejhallgatókat a Sonytól, a Bose, Sennheiser felsőkategóriás termékei pedig 100 – 120 ezer Ft körül mozognak. A középkategóriát a Panasonic és az Audio Technica termékei képviselik.

Az utóbbi időben több névtelen gyártó is megjelent olcsó, aktív zajcsökkentést tartalmazó fejhallgatókkal, melyek közül egyet, az AMP termékét, részletes vizsgálatoknak vetettünk alá. Az árát tekintve középkategóriás, de technikai paramétereiben sokat ígérő, Bluetooth fejhallgatót kínál a Nokia.

Külföldön már \$20-ba kerülő fejhallgatókkal is találkozhatunk, sőt kifejezetten zajvédelmi feladatokra kialakított fülvédőkkel is, melyekben aktív zajelnyomás is található. Ezek alaposabb megismerésére nem volt lehetőségem, de elképzelhető, hogy kialakításuk jelentősen eltér a zenei fejhallgatókétól, mivel általános, folyamatos zajok helyett hirtelen zörejek ellen ajánlják őket (pl. sportlövészethez).

Az egyes termékekről nagyon kevés objektív tesztadat áll rendelkezésre, a hirdetésekben szereplő információk változó minőségűek és nehezen értelmezhetők. A tájékoztató anyagok egy része egyáltalán nem utal az elnyomás mértékére, más prospektusok egyetlen százalékos értéket adnak meg.

Kellemes kivételt jelent ez alól a tesztelt AMP fejhallgató, mely a gyártó állítása szerint 18 dB elnyomást produkál 300 Hz-en. Az érték a méréseim során helytállónak bizonyult szinuszos zavarok esetén. Az áruházi prospektusokban más gyártók fejhallgatóinál is lehet találkozni a 300 Hz-es frekvencia megjelölésével, amely feltehetőleg az a frekvencia, ahol a legnagyobb mértékű zajelnyomás érhető el a termékkel.

A jelenleg kapható fejhallgatók túlnyomó többsége analóg elven működik. A Sony 2008-ban mutatta be az MDR-NC500D fejhallgatót, amely állítása szerint az első digitális elven működő ANC-s fejhallgató volt. [4]

## 2.2. Alsó kategóriás fejhallgatók tesztje

A tanszéken alaposan megvizsgáltunk és bemértünk két alsó kategóriás fejhallgatót.

<b>Sony MDR-NC7</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• 20.000 Ft</li><li>• 7 dB Sony szerint</li></ul> 	<b>AMP XQS-109</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• 3000 Ft</li><li>• 18 dB @ 300 Hz</li></ul> 
---	--

Az AMP fejhallgatót szétszedve fülkosaranként egy-egy analóg áramkört találtunk. Mindegyikhez csatlakozott egy mikrofon a kosár külső oldaláról és egy másik a belső oldalról. Ez előrecsatolt struktúrára utal, amelyben a külső mikrofon szolgál referenciaként, a belső pedig a zajelnyomás érzékelőjeként.

Lehetséges, hogy az előrecsatolt elrendezés visszacsatolt struktúrával is kiegészül. Ennek lehetőségét az [5] irodalom veti fel, mely megjegyzi, hogy a visszacsatolt struktúrájú analóg zajcsökkentő rendszerek egy adott frekvencián működnek optimálisan, a magas frekvenciák tartományában pedig nemhogy csökkentenék a zajt, de ki is emelik azt. A kiemelés tartományát *high frequency enhancement region*-ként említi. Ezt a kiemelést mindkét fejhallgató esetében tapasztaltuk.

A mérés során rögzítettük a fejhallgatók elnyomását szinuszos és sztochasztikus zavarokra. A fejhallgatók passzív zajelnyomásával nem foglalkoztunk.

### 2.2.1. A mérési elrendezés

A fejhallgatók képességeit rendeltetésszerű használat mellett kellett felmérni, hogy biztosítva legyenek a gyártó által feltételezett körülmények. Ehhez egy műfej

kialakítására volt szükség, mely az emberi fej főbb akusztikus jellemzőit megfelelően közelíti.

A 2.1. ábrán látható műfejet hungarocell táblákból készítettük el. Azért esett erre az anyagra a választás, mert puha, akusztikus ellenállása kicsi, és pl. a fával szemben nem verődnek vissza róla a hanghullámok. A visszaverődések az emberi fejre sem jellemzők, jelenlétük pedig bonyolultabbá tenné a fejhallgatók kosarában tapasztalható akusztikus teret, és a zajcsökkentés teljesítményének romlását eredményezhetnék.

Egy tömör téglatestet alakítottunk ki a hungarocellból, melyen hallójárat gyanánt 1 cm-es furatot készítettünk, ebbe helyeztük a mérőmikrofont.

A méréshez egy Voltcraft SL-400 digitális zajszintmérőt használtunk, melynek mikrofonját a zajszintmérő tartozék kábele segítségével helyeztük el a műfejben.



*2.1. ábra – A műfej kialakítása*

A műfejet 70 cm magasságban, egy asztalon, egy terem közepén helyeztük el. Törekedtünk arra, hogy a falaktól, és berendezésektől távol legyen, csökkentve így annak lehetőségét, hogy a reflexiók túlzottan kihassanak a mérési eredményekre. A fejtől 2 m-re helyeztünk el egy hangszórót, melyet függvény- és zajgenerátorokkal hajtottunk meg, így előállítva az elnyomandó zajt. A mérési elrendezés 2.2. ábrán látható.



*2.2. ábra – A fejhallgatók tesztjének mérési elrendezése*

A fejhallgatókat elhelyeztük a műfejen, gondoskodva arról, hogy a passzív zajcsökkentést biztosító párnák megfelelően felfeküdjenek a hungarocell felületére.

Mindkét fejhallgató ki-be kapcsolható ANC funkcióval rendelkezik. Az elnyomás méréséhez először kikapcsolt, majd bekapcsolt állapotban jegyeztük fel a zaj értékét és a két eredmény különbségét képeztük.

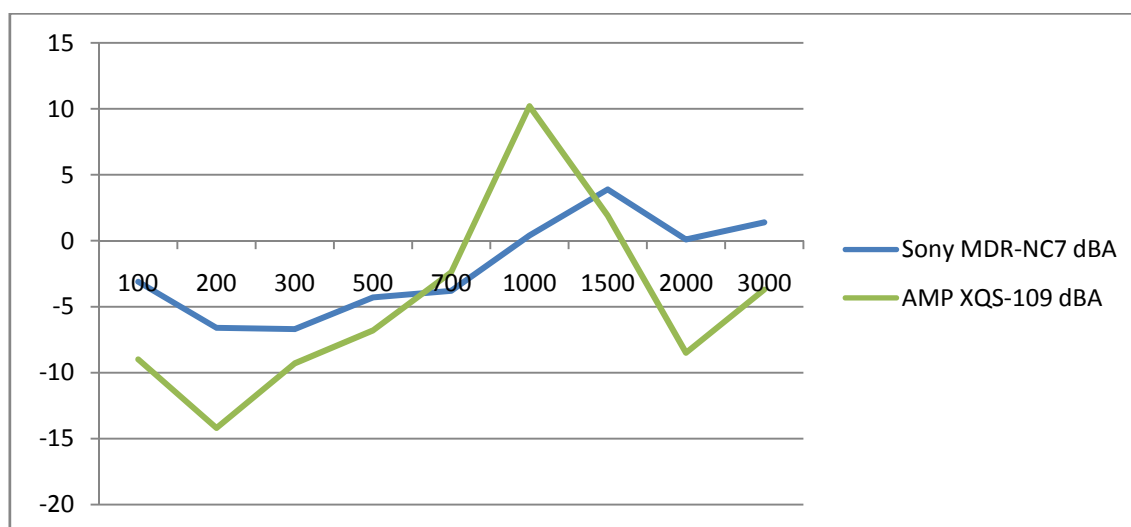
### **2.2.2. Zajelnyomás szinuszos zavarok esetén**

Az első mérésnél a függvénygenerátor segítségével 100 Hz – 3000 Hz közötti szinusz jelet adtunk a hangszóróra. A hangerőt kézzel állítottuk be oly módon, hogy a háttérzajnál legalább 30-40 dB-lel nagyobb zajszintet mérjünk zajcsökkentés nélkül. A szinuszos zajforrás hangereje a mérések során változott, kizárólag egy adott fejhallgató és egy adott frekvencia esetén volt állandó.

A mérési eredmények a 2.1. táblázatban, illetve a 2.3. ábrán láthatók.

[Hz]	100	200	300	500	700	1000	1500	2000	3000
<b>MDR-NC7</b>	-3,1	-6,6	-6,7	-4,3	-3,8	0,4	3,9	0,1	1,4
<b>XQS-109</b>	-9	-14,2	-9,3	-6,8	-2,4	10,2	1,9	-8,5	-3,7

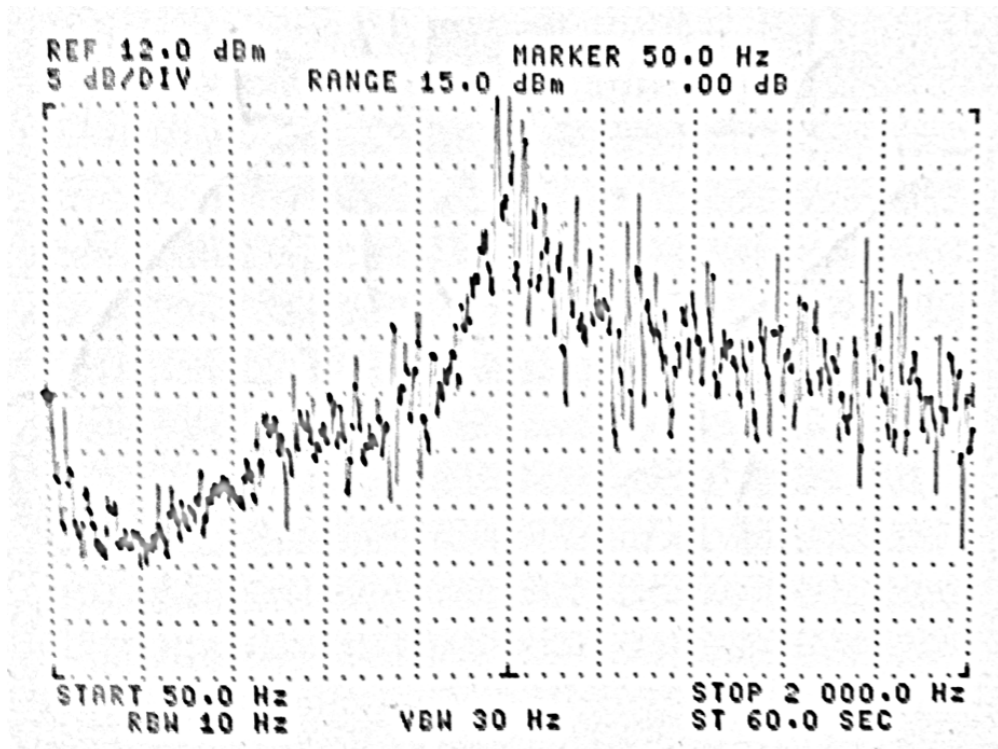
2.1. táblázat – A zajelnyomás mértéke szinuszos zavarokra (dBA)



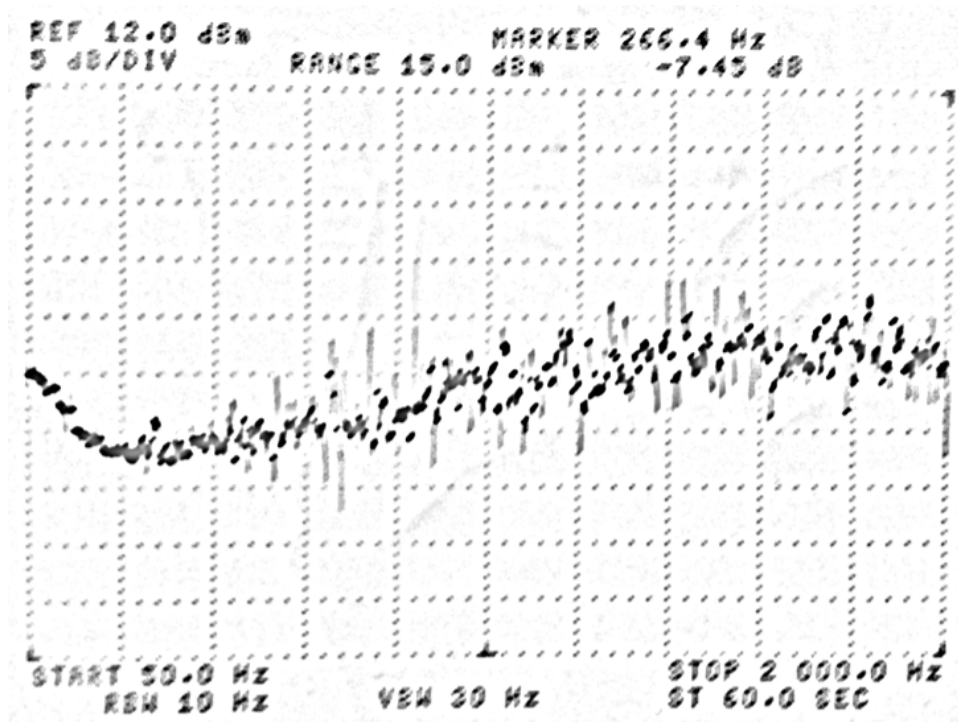
2.3. ábra – Alsó kategóriás fejhallgatók szinuszoszavar-elnyomása

Az elnyomási értékeket frekvenciaanalizátor segítségével is megmértük, így részletesebb felbontást kaptunk a frekvenciatengely mentén. A zajszintmérő kimenetét a frekvenciaanalizátor bemenetére kötöttük, a hangszórót pedig annak *sweep* kimenetéről hajtottuk meg.

A frekvenciaanalizátorral az 50-2000 Hz-es tartományt pásztáztuk végig 60 másodperc alatt. Ez az ütem megfelelően lassúnak bizonyult ahhoz, hogy a fejhallgatók elnyomása minden frekvencián beálljon az optimális értékre. Először kikapcsolt, majd bekapcsolt ANC mellett végeztük el a mérést, és a két eredmény különbségét képeztük. A frekvenciaanalizátoron ábrázolt eredmények a 2.4. és 2.5. ábrán láthatók.



2.4. ábra – AMP XQS-109 zajelnyomás



2.5. ábra – Sony MDR-NC7 zajelnyomás

Az így kapott grafikonok jellege megegyezik a zajszintmérővel kapott eredményekével. Mindkét fejhallgató 250 Hz környékén produkálta a legjobb elnyomási értéket, az AMP -12,5 dB-t, a Sony pedig -7 dB-t.

Az AMP fejhallgató 1000 Hz-en közel 20 dB-es, a Sony közel 5 dB-es kiemelést produkált.

A kissé eltérő eredmények a frekvenciaanalizátor működéséből adódhatnak, melynek következtében a kapott elnyomási értékek szelektíven csak az adott frekvenciára észlelt jelekre vonatkoznak. A zajszintmérő által alkalmazott dBA érték ugyanakkor a zajvédelmi mérési feladatok széles körben alkalmazott, szabványos mennyisége, így a felhasználói élmény szempontból mindenképpen releváns.

Az eredmények fényében elmondható, hogy a fejhallgatók szinuszos zavarok esetén teljesítik a meghirdetett értékeket, az optimális, 250 Hz-es frekvenciától távolodva ugyanakkor teljesítményük csökken, 1000 Hz-nél pedig jelentős kiemelés tapasztalható. Bár a szerkezeti és áramköri kialakítást megvizsgálva nyilvánvalóan használnak előrecsatolt struktúrát, lehetséges, hogy visszacsatolt struktúrával is kiegészülnek, amely [5] alapján magyarázatot ad a kiemelési jelenségre.

### 2.2.3. Zajelnyomás sztochasztikus zavarok esetén

A sztochasztikus zavarokra vonatkozó mérés során a hangfalat HO1-3722A zajgenerátor segítségével hajtottuk meg.

Végtelen periódushosszú, 500 Hz sávszélességű zajt állítottunk elő, és feljegyeztük a zajszintmérő által mutatott értéket be- és kikapcsolt ANC mellett. 1500 Hz-es és annál nagyobb sávszélességű zaj esetén már nem produkáltak mérhető zajcsökkentést a fejhallgatók.

Sony MDR-NC7	AMP XQS-109
-2 dBA	-5 dBA

2.2. táblázat – A zajelnyomás mértéke 500 Hz sávszélességű sztochasztikus zajra

A sztochasztikus zajok esetén tapasztalt viszonylag hatékony elnyomás egyértelműen az előrecsatolt struktúra jelenlétére utal.

#### 2.2.4. Személyes tapasztalatok

A szubjektív tesztek során az AMP fejhallgatója sokkal jobbnak bizonyult. A 300 Hz körüli szinuszos zavarokat nagyon jelentős mértékben lehalkította, az 1000 Hz-es zajt viszont kellemetlenül felerősítette. A gyakorlatban ugyanakkor nem okozott problémát a kiemelés, mivel a magasabb frekvenciájú zavarok kikapcsolt zajcsökkentés mellett is halkabbnak tündek, amely a fület körülölelő párnázott kosár passzív reflexiójának és csillapításának tudható be.

Az alacsony frekvenciájú susogó hangokat, pl. a ventilátorok zúgását, vagy a város morajló háttérzajt jól érezhetően lehalkította. Az utcán közlekedve ugyanakkor nagyon zavarónak bizonyult a zajcsökkentés irányérzékenysége. A zaj irányának (illetve a fejem helyzetének) kismértékű változása esetén is érezhetően változott a csillapítás mértéke. Ennek következtében a városban való mozgás közben a környezeti zajok egy kellemetlen, állandóan változó, hullámzó érzetet keltettek.

Az analóg előreccsatolt rendszer valószínűsíthető működése megmagyarázza a tapasztalt jelenséget. A fejhallgató elektronikája a külső referenciamikrofon jelét fix késleltetést követően, az erősítés visszacsatolt, automatikus szabályozása mellett küldi ki a hangszóróra. [5] A késleltetés értékét valószínűleg az alapján határozták meg, hogy a referenciamikrofon és hangszóró közötti tengely hosszát mennyi idő alatt teszi meg a hang. Ez a késleltetés azonban csak a tengely által kijelölt irányból érkező zajok esetén biztosítja az optimális elnyomást.

Míg a Sony termékében található zajcsökkentő megoldás elhanyagolható mértékben javítja a felhasználói élményt, addig az AMP fejhallgató összességében kellemes benyomást tett. Városi közlekedéshez nem ajánlható, alkalmas lehet viszont ülőmunka mellett a számítógépek zajának kiszűrésére. A tapasztalt irányérzékenység valószínűleg más egyreferenciás előreccsatolt rendszerű fejhallgatóra is jellemző, de fontos megemlíteni, hogy ez a termék valamennyi közül az egyik legolcsóbb megoldás.

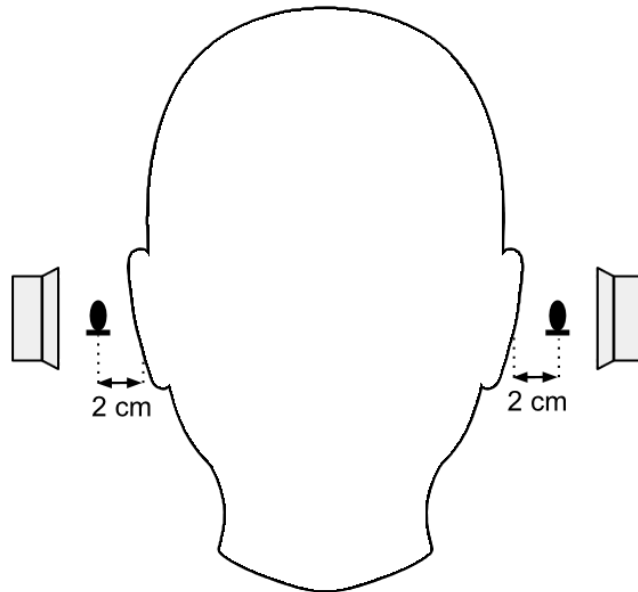
A gyártók nagyon kevés technikai információt tesznek közzé termékeikről. Említésre méltó a Nokia, mely BH-905-ös fejhallgatójának promóciós anyagaiban kiemelt helyen említi a 8 zajcsökkentő mikrofon alkalmazását. Ezek között praktikus okokból feltehetően csatornánként egy-egy zajmikrofont és három-három referenciamikrofont találunk. Lehetséges, hogy ennek oka éppen a zajelnyomás irányfüggésének csökkentése.



Egyéni felhasználói beszámolók alapján a felső kategóriás termékek sokkal jobb hatásfokú zajcsökkentő funkcióval rendelkeznek, ezek tesztelésére azonban nem volt lehetőségem.

### 3. A nyílt kialakítás akusztikai vizsgálata

Az első nyílt kialakítású kísérletek során abból a bevezetőben is említett ökölszabályból indultam ki, mely szerint  $\lambda$  hullámhosszúságú hullámok kioltása  $\lambda/4$  sugarú környezetben érzékelhető.



3.1. ábra – Az első nyílt kialakítású kísérleti elrendezés

A 3.1. ábrán látható első kísérleti elrendezésben a fültől 2 cm-re elhelyezett zajmikrofonokat, és velük egy tengelyen elhelyezett beavatkozó hangszórókat alkalmaztam. Az ökölszabály értelmében még a

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{340 \text{ m/s}}{0,08 \text{ m}} = 4250 \text{ Hz}$$

frekvenciájú komponensek elnyomása is érzékelhető volna egy így kialakított elrendezésben.

A mérések során azonban gyorsan kiderült, hogy ez az elrendezés még alacsony frekvenciákon sem alkalmas a fülnél megfelelő mértékű zajelnyomás létrehozására. A zajmikrofon jelen jól látszott az elnyomás megvalósulása, azonban a zajszintmérős tesztek és a személyes próbák alapján ez nem terjedt ki a fül irányába.

Nyilvánvalóvá vált, hogy az aktív zajcsökkentési feladatot nem lehet pusztán jelfeldolgozási problémaként kezelni, hanem az akusztikai tér vizsgálatára és körültekintő tervezésre van szükség.

## 3.1. Számítógépes szimulációk

A különböző zajcsökkentési elrendezések során kialakuló tér vizsgálatához egy Matlab-programot készítettem. A program azonos frekvenciájú, szinuszos források hullámainak szuperpozíciójával számolja ki az általuk létrehozott akusztikus teret.

### 3.1.1. A szimulációs program ismertetése

A fő m-fájlban lehetőségünk van pontszerű zajforrások megadására, valamint az elnyomási pontok (zajmikrofonok) és a beavatkozók helyzetének előírására. Ezt követően a program kiszámolja a beavatkozónak a négyzetes költségfüggvény minimalizálásához szükséges meghajtását, és meghatározza a hangnyomásszintet az általunk behatárolt tér valamennyi pontjában. Végül megjeleníthető a tér dB osztású hangnyomásszint- és elnyomásiszint-térképe.

A teret létrehozó zajforrások és beavatkozók a `PointSource` osztály példányai. Az osztály tárolja az általa reprezentált forrás koordinátáit (2D), a forrás amplitúdóját és fázishelyzetét. Az osztály `getPhasor(x, y)` függvénye segítségével megkaphatjuk az adott forrás járulékos hatását a tér tetszőleges pontjában.

A zajmikrofonokat a `Vector2D` osztály példányai reprezentálják, és csupán a tér egy pontjának kijelölését szolgálják.

A szimuláció futtatása előtt az alábbi paraméterek meghatározására van szükség.

- vizsgálti frekvencia (`freq`) – [Hz]
- vizsgálati felbontás (`res`) – [m]
- a vizsgált terület mérete – [m],[m]
- zajforrások (`src`) – `PointSource` tömb
- zajmikrofonok (`mic`) – `Vector2D` tömb
- beavatkozók (`act`) – `PointSource` tömb

A program által végrehajtott feladat a következőképpen írható le.

1. a zajforrások által létrehozott tér kiszámítása
2. a mikrofonok és a beavatkozók közötti átviteli együtthatók kiszámítása (eredménye  $m$  mikrofon és  $n$  beavatkozó esetén egy  $m \times n$ -es  $\mathbf{H}$  mátrix)
3. a mikrofonok helyén található hangnyomásszint rögzítése (eredménye egy  $m$  hosszú  $\mathbf{c}$  oszlopvektor)

4. a beavatkozók amplitúdójának és fázishelyzetének meghatározása (egy  $\mathbf{x}$  oszlopvektorban tárolt komplex amplitúdók formájában) oly módon, hogy a mikrofonok helyén tapasztalt hangnyomásszintek négyzetösszege minimális legyen
5. az 1. pontban kiszámolt eredmények elmentése
6. a beavatkozók által létrehozott tér szuperponálása az 1. pontban kiszámolt térre
7. az 1. és 6. pontban kiszámolt eredmények arányképzése és dB skálára való átszámítása, az eredmények ábrázolása

A 4. lépés során egy lineáris egyenletrendszert kell megoldani.

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{c}$$

Ahol  $\mathbf{z}$  a zajcsökkentést követő hangnyomásszintek vektora. Keressük  $\mathbf{x}$ -nek a  $\mathbf{z}$  elemeinek négyzetösszegét minimalizáló megoldásai közül azt, amelynek abszolút értéke minimális. Matlabban ezt a megoldást (*minimum norm*) a `pinv` függvény segítségével határozhatjuk meg.

$$\mathbf{x} = \text{pinv}(\mathbf{H}) * (-\mathbf{C})$$

A minimális abszolút értékű megoldásra a beavatkozók kiegyenlített vezérlése érdekében van szükség. Képzeljük el pl. azt az esetet, amikor két beavatkozót és tőlük azonos távolságra egy kioltási pontot definiálunk. Ekkor  $z = 0$  teljesíthető oly módon, hogy az egyik beavatkozóval előállítjuk a kioltási ponthoz tartozó ellenzajt, és teljes kioltást valósítunk meg, miközben a másik beavatkozót egyáltalán nem hajtjuk meg.

A gyakorlatban ugyanakkor nagyobb valószínűséggel áll elő olyan megoldás, ahol mindkét beavatkozó hozzájárul a kioltáshoz. Ettől a megoldástól nagyobb területre kiterjedő, egyenletesebb elnyomást remélhetünk. Az előbbi példánál maradva, annak minimális abszolút értékű megoldása éppen az, amikor a beavatkozókat azonos mértékben hajtjuk meg.

A program a kiszámított mezőket az `imagesc` függvény segítségével ábrázolja az alábbi jelölések alkalmazásával.



3.2. ábra – A szimulációs program jelölései

### 3.1.2. Különböző elrendezések elnyomási terének vizsgálata

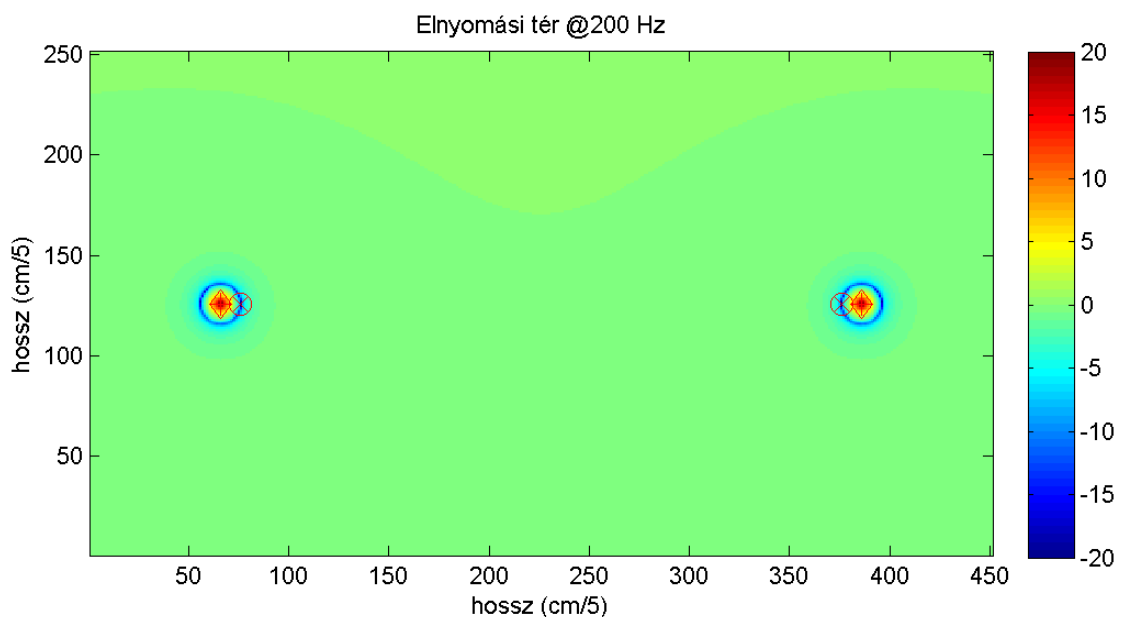
#### Az első kísérleti elrendezés vizsgálata

A 3.4. ábrán látható a 3.1. ábrán bemutatott elrendezés szimulációjának eredménye. Egymástól 60 cm távolságra elhelyezett zajmikrofonokat 2 cm távolságról fog közre két beavatkozó. A zajforrás az elrendezés tengelyétől 2 m-re található.

```
% Zajforrások (x, y, frekvencia, fázis, teljesítmény)
src = [PointSource(.45, 2.25, freq, 3*pi/4, 50)
];

% Zajmikrofonok (x, y)
mic = [Vector2D(.15, .25),
Vector2D(.75, .25)
];

% Beavatkozók (x, y, frekvencia)
act = [PointSource(.13, .25, freq),
PointSource(.77, .25, freq)
];
```

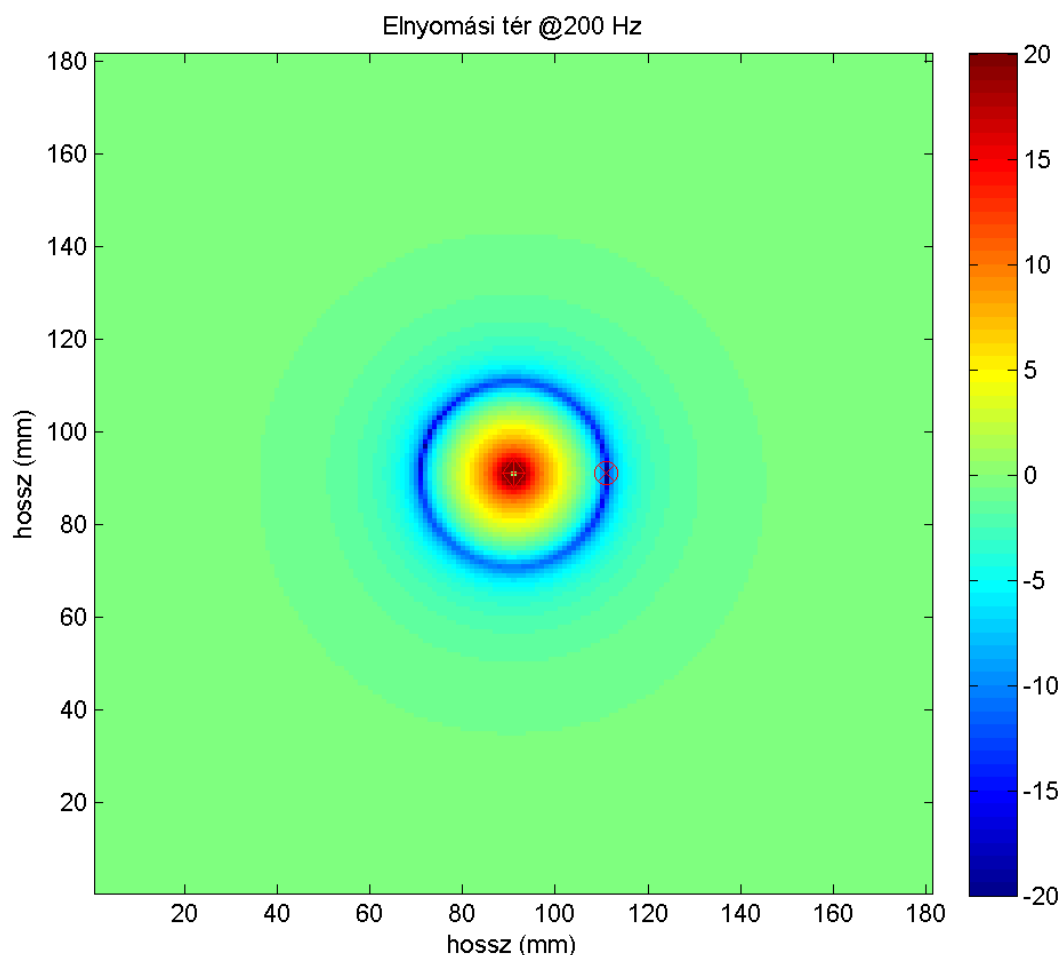


3.4. ábra – Az első kísérleti elrendezés szimulációja

Az elrendezés egészét átfogó szimuláció képével kapcsolatban két dolgot vehetünk észre. Az egyik, hogy a vizsgált terület nagy részén 0-hoz közeli elnyomást láthatunk. A kék árnyalataival jelölt elnyomási tér kiterjedése nagyságrendileg elmarad a  $\lambda/4$ -es szabály alapján várhatótól.

A másik észrevétel igazából az elsőből következik: a két oldal elnyomási képe független egymástól, a beavatkozók hatása csak a velük megegyező oldalon érzékelhető.

A továbbiakban ezért az egyik oldal eszközeit elhanyagolom, és a vizsgált térrészt a másik oldal közvetlen környezetére szűkítem, a szimuláció felbontását megnövelem. A bal oldal nagyobb felbontású szimulációjának eredményét mutatja a 3.5. ábra.



3.5. ábra – Az első elrendezés nagyfelbontású vizsgálata

A -5 dB-es elnyomás egy kb. 6 mm vastagságú gyűrűre terjed ki. A hangszórók közelterében található elnyomási mező jellegzetességeit nem a fázis-, hanem az amplitúdóviszonyok határozzák meg.

A pontszerű hangforrástól  $r$  távolságban kialakult mező felületi teljesítménysűrűsége  $1/r^2$  szerint alakul. A beavatkozótól 2 cm-re a hang teljesítménysűrűsége

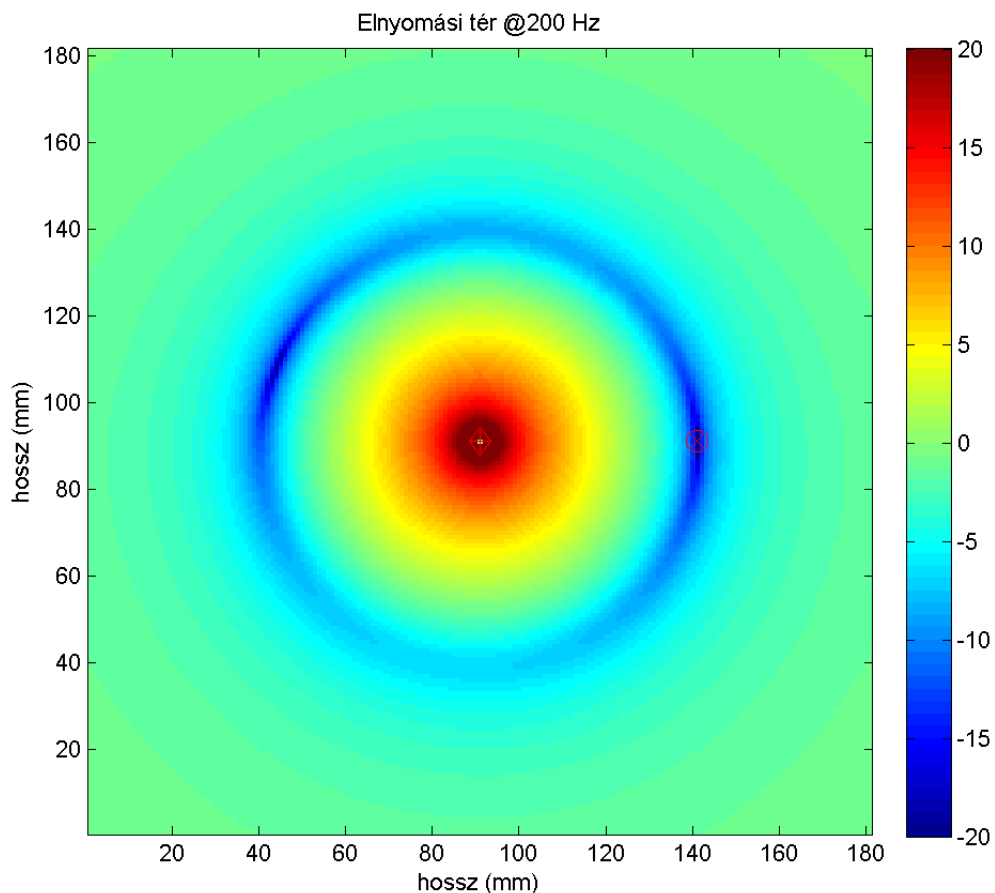
$$10 \cdot \lg \left( \frac{r^2}{(r+1)^2} \right) \Big|_{r=2} = -3,52 \text{ dB}$$

mértékben csökken cm-enként, míg a 2 m-re lévő zajforrásé ugyanezen távolságon legfeljebb mindössze  $-0,04$  dB-lel változik.

Az egyéni zajcsökkentő berendezések méreteiből adódóan tehát a hangnyomásszint négyzetes csillapodása a meghatározó tényező az elnyomás kiterjedése szempontjából.

A hangszóró és a zajmikrofon távoltásával az elnyomási sáv szélesíthető.

```
% Zajforrások
src = [PointSource(.45, 2.1, freq, 3*pi/4, 50)];
% Zajmikrofonok
mic = [Vector2D(.14, .09)];
% Beavatkozók
act = [PointSource(.09, .09, freq)];
```



3.6. ábra – A beavatkozó és zajmikrofon közti távolság növelésének hatása

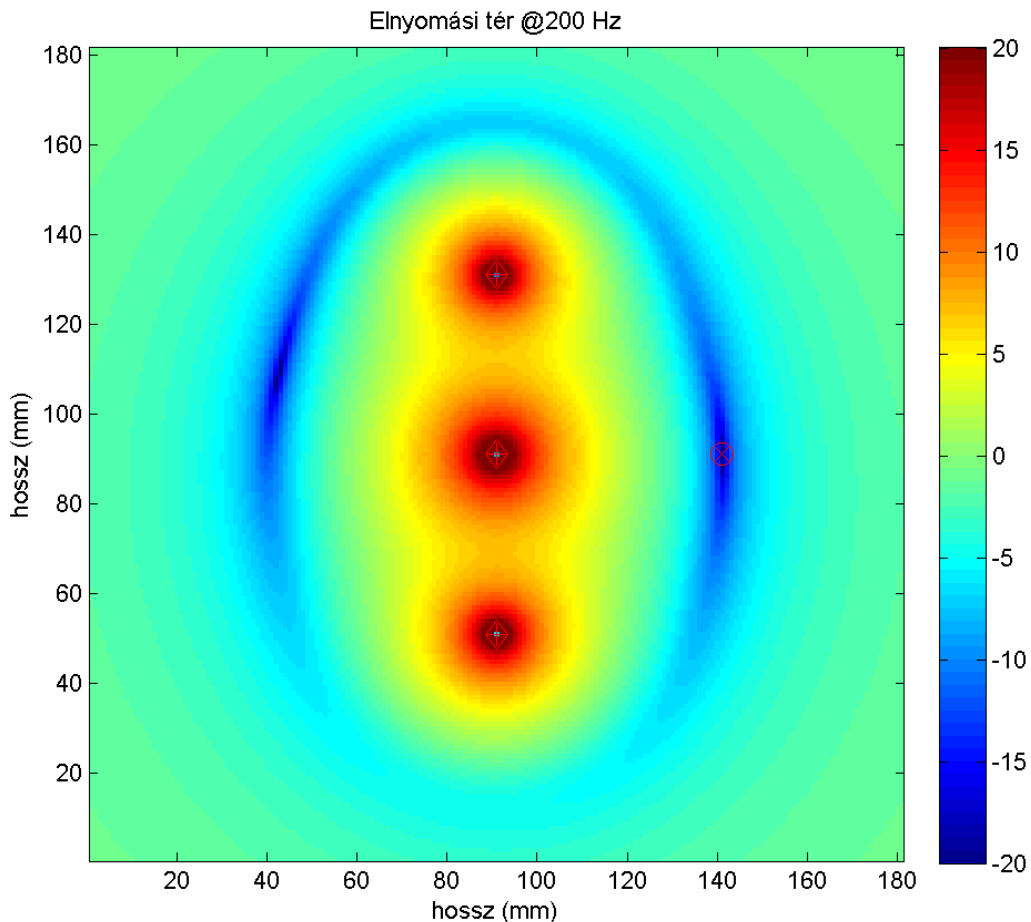
A 3.6. ábra alapján a távolság 5 cm-re növelését követően a -5 dB-es elnyomási sáv 1,6 cm-re szélesedett. A gyakorlati alkalmazáshoz ez még mindig kevés, és ezt a távolságot már csak a hordozhatóság rovására lehetne növelni.

#### Több beavatkozó alkalmazása

Sok, egy tengely mentén elhelyezett pontszerű hangforrás elvileg hasonlóan viselkedne egy síkban kiterjedt forráshoz képest. Amíg a forrásoktól való távolság kisebb, mint a források együttes kiterjedése, addig az akusztikus tér viszonyai a végtelen kiterjedésű forrás terével, azaz síkhullámokkal volna közelíthető.

A gyakorlatban a hangszórók kiterjedése és a rendszer kompaktságának követelménye miatt nincs lehetőség túl sok beavatkozó használatára, ezért a néhány hangszóró által kialakított elnyomás vizsgálatával foglalkoztam.

```
% Zajforrások
src = [PointSource(.45, 2.1, freq, 3*pi/4, 50)];
% Zajmikrofonok
mic = [Vector2D(.14, .09)];
% Beavatkozók
act = [PointSource(.09, .05, freq), PointSource(.09, .09, freq),
      PointSource(.09, .13, freq),];
```



3.7. ábra – Három, 4 cm-enként elhelyezett hangszóró tere



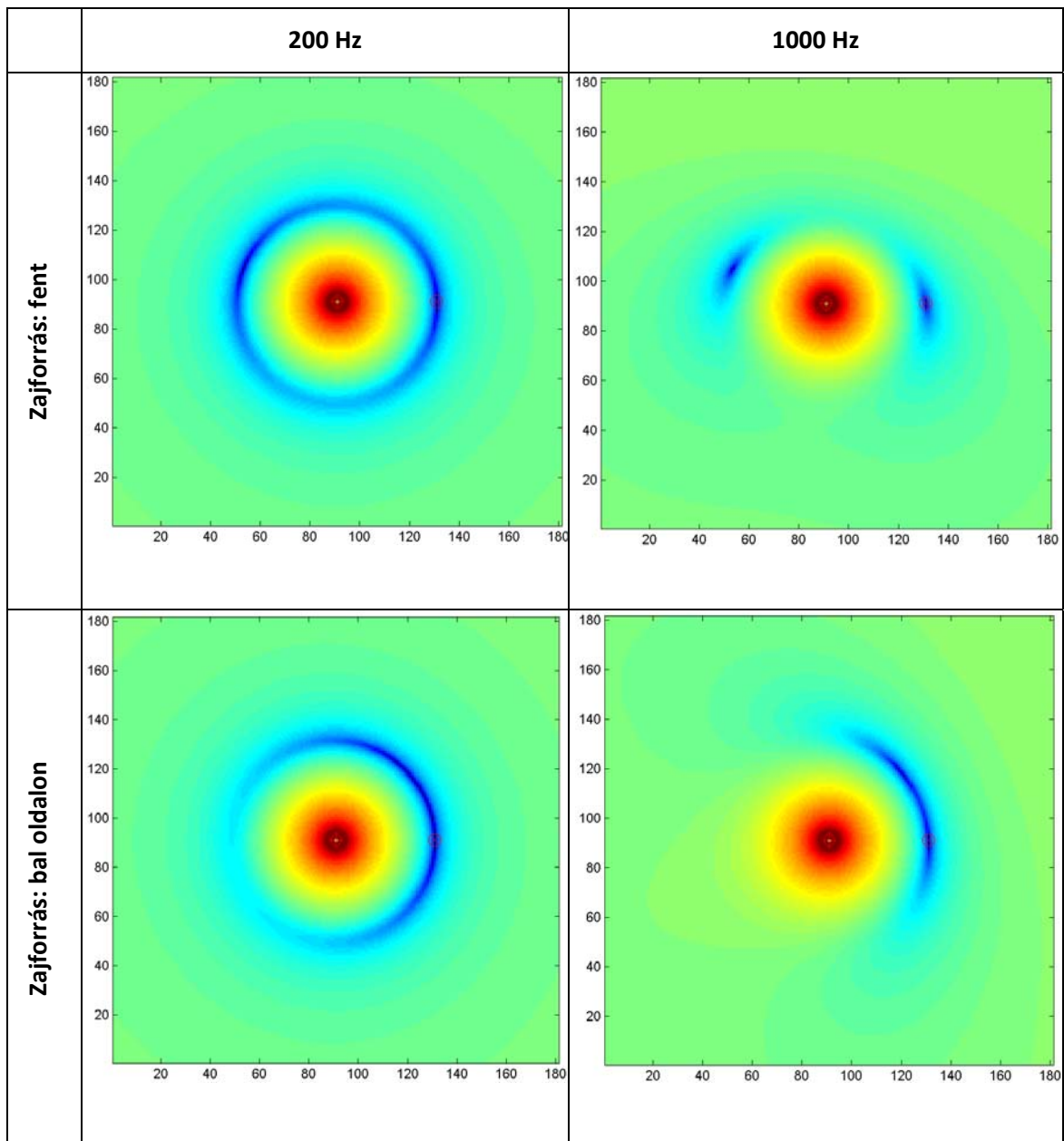
A 3.7. ábrán látható, hogy több beavatkozó elhelyezésének hatására valóban szélesedik az elnyomási sáv a zajmikrofon irányában (miközben arra merőleges irányban vékonyodik). Azonban még három beavatkozó esetén is csak 2,1 cm-es a -5 dB-es sáv szélessége, ennyi hangszóró elhelyezése pedig már problémát jelent egy hordozható eszköz esetén.

#### Az elnyomási sáv kör irányú kiterjedése

Az első elrendezés vizsgálatánál tapasztalt körgyűrű alakú elnyomási sáv felveti annak lehetőségét, hogy a hangszórót és a zajmikrofont oly módon helyezzük el a fül mellett, hogy a zajmikrofon és a fül azonos távolságra essen a hangszórótól. Így a felhasználónak a zajmikrofon helyén létrejövővel azonos mértékű zajelnyomást biztosíthatnánk.

Az elképzelés gyakorlati hasznosíthatóságának feltétele, hogy az elnyomási terület a hangszóró-zajmikrofon tengelytől tetszőleges frekvenciájú és tetszőleges irányból érkező zaj esetén is legalább 45°-os ívben kiterjedjen.

Egymástól 4 cm-re elhelyezett hangszóró és mikrofon elnyomási terét vizsgáltam meg különböző frekvenciájú és különböző irányokból érkező zajok esetén. A zajforrást minden esetben 2 m távolságban helyeztem el. A szimulációkat 100 Hz-es lépésközökkel végeztem el. A frekvencia növelésének hatására az elnyomási tér egyenletesen változva alakul, ezért csak a szélső eseteket mutatom be a 3.8. ábrán.

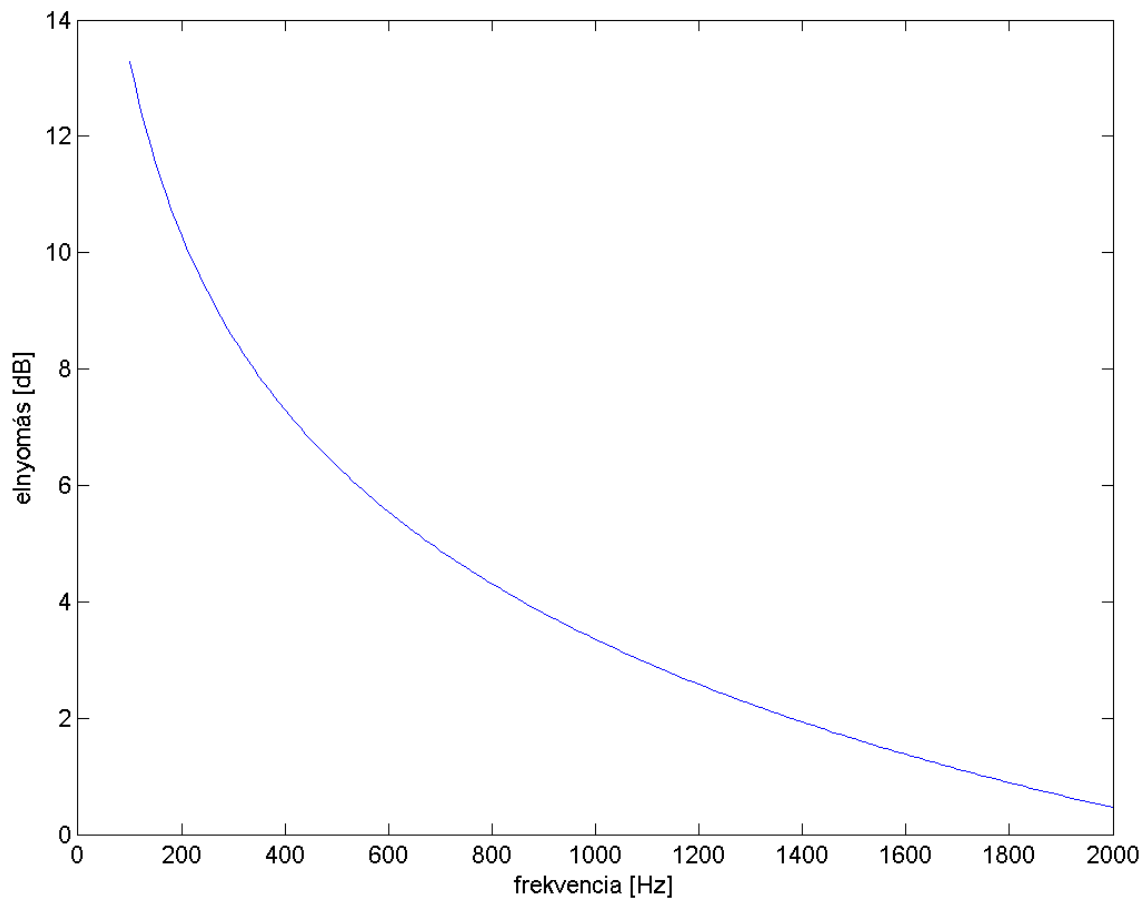


3.8. ábra – Különböző frekvenciájú és irányú zajok elnyomási tere

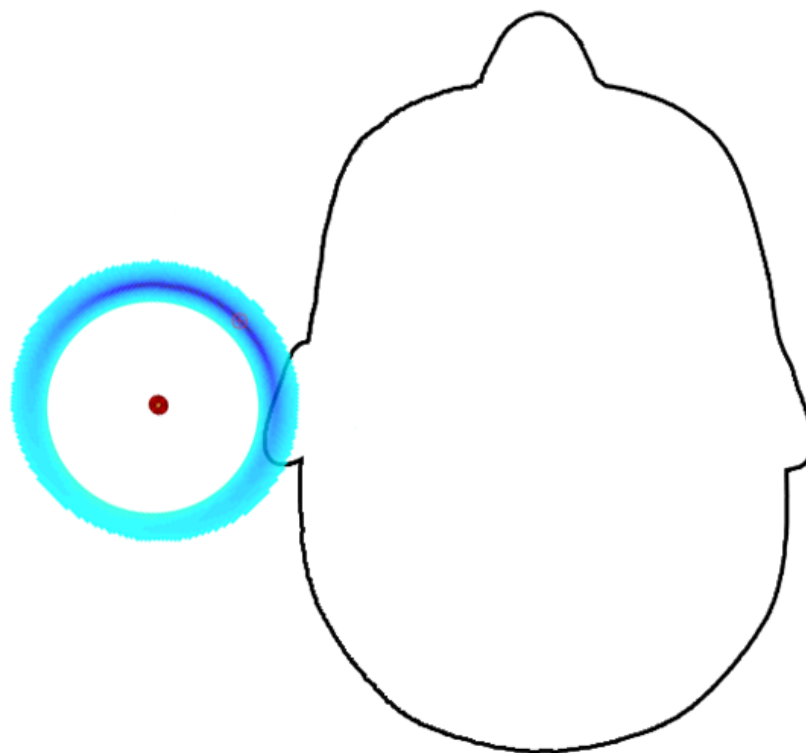
A legrosszabb elnyomási értéket abban az esetben kapjuk, amikor a zajforrás a hangszóró és a mikrofon által kijelölt tengelyre merőlegesen helyezkedik el. A 3.9. ábrán látható, hogy 1 kHz-nél ekkor 3,8 dB-es elnyomás tapasztalható.

Ez az érték legrosszabb esetként elfogadható. Más irányból érkező zajok és alacsonyabb frekvenciák esetén a rendszer ennél jobban teljesít. Kisméretű, könnyen pozicionálható mikrofon esetén lehetséges a 45°-nál kevésbé elfordított elrendezés alkalmazása is, ami tovább javítja a rendszer teljesítményét.

Mindezek fényében a 3.10. ábrán látható elrendezés tűnik optimálisnak az egybeavatkozó rendszerek közül.



3.9. ábra – Einyomás 45°-nál a frekvencia függvényében



3.10. ábra – A szimulációs eredmények alapján javasolt elrendezés

## 3.2. Hangszóró iránykarakterisztikájának mérése

A szimulációk során feltételeztük, hogy a felhasznált hangszóró pontszerű forrásként viselkedik. Egy valódi hangszóró hátulsó részének a közelében ez a feltételezés szinte biztosan téves. A 3.10. ábrán bemutatott elrendezés működéséhez ugyanakkor elegendő, ha a hangszóró előtti tér legalább  $90^\circ$ -os szöget bezáró részén a pontszerű forráséhoz hasonló hangerősségmezőt kapunk.

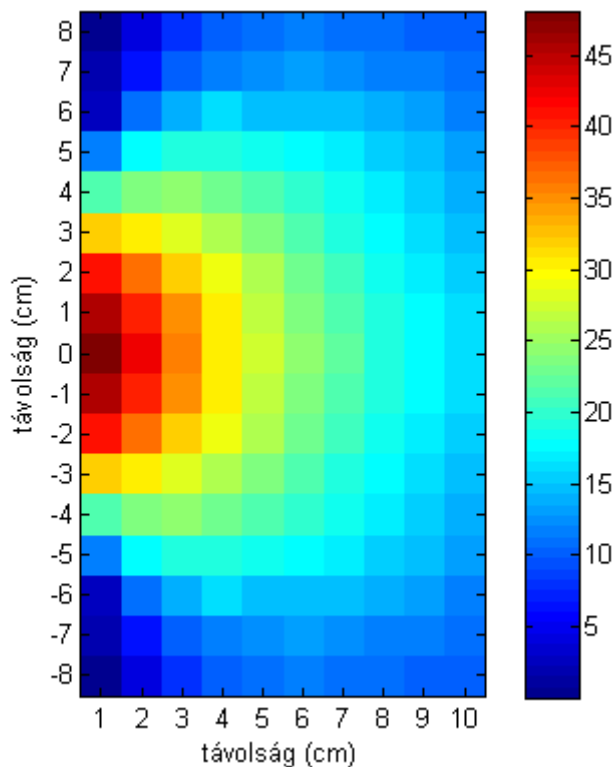
A mérés során felhasznált eszközök az alábbiak.

- LSM-50M/NO-B hangszóró, 2 W teljesítmény, 5 cm-es membrán
- Voltcraft SL-400 digitális zajszintmérő
- függvénygenerátor
- teljesítményerősítő
- cm osztású rácsozott papír
- kisméretű állványok

A hangszórót és a zajszintmérő mikrofonját az általam elkészített, 15 cm magas állványokra rögzítettem. Ezek elsődleges szerepe az eszközök elemelése az asztaltól, hogy az esetleges visszaverődések intenzitása már ne legyen számottevő. Az állványok alján drótból készített mutató jelezte a rajta található eszköz helyzetét. Az állványokat a rácsozott papír fölött mozgattam, így a mutatók segítségével gyorsan le lehetett olvasni az eszközök helyzetét. A hangszórót a teljesítményerősítő segítségével hajtottam meg, melynek jelét a függvénygenerátor szolgáltatta.

A mérés során a hangszóró helyzetét rögzítettem, és a zajszintmérő állványra rögzített mikrofonjával végigpásztáztam az előtte található területet. A mikrofont rácspontról rácspontra mozgattam, és mindegyikhez rögzítettem a zajszintmérőn olvasható hangerősségértéket. A hangszóró 300 Hz-es szinuszt bocsátott ki még torzítatlan hangerősség mellett.

A hangszóró mechanikai szimmetriájából adódóan elég volt a hangszóró középvonalától az egyik oldalra eső rácspontokon végighaladnom, a mező teljes képét ezen adatok tükrözésével állítottam elő. A mérési eredményeket a Matlab `imagesc` függvénye segítségével ábrázoltam (3.11).



3.11. ábra – Az LSM-50M/NO-B hangszóró hangerősségmezője

A hangszóró által létrehozott mező kiegyenlített képet mutat, kb. 100°-os szögben a megegyezik a pontszerű forrás mezejével.

### 3.3. Kísérletileg létrehozott elnyomási tér feltérképezése

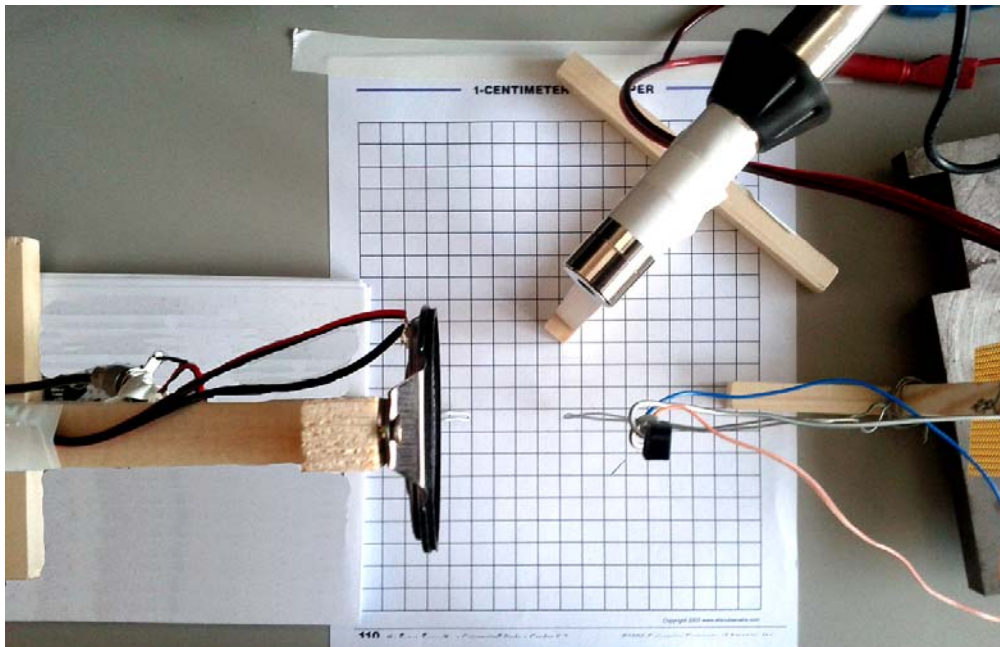
A 3.1.2. fejezetben az egybeavatkozás elrendezés terére kapott eredményt kísérleti úton ellenőriztem.

A méréshez a következő eszközöket használtam fel.

- LSM-50M/NO-B hangszóró, 2 W teljesítmény, 5 cm-es membrán
- Nokia 2100 mikrofon
- Brüel & Kjær mérőerősítő
- Voltcraft SL-400 digitális zajszintmérő
- aktív hangfal
- függvénygenerátor
- teljesítményerősítő
- cm osztású rácsozott papír
- kisméretű állványok
- DSP fejlesztőkörnyezet NFXLMS algoritmussal

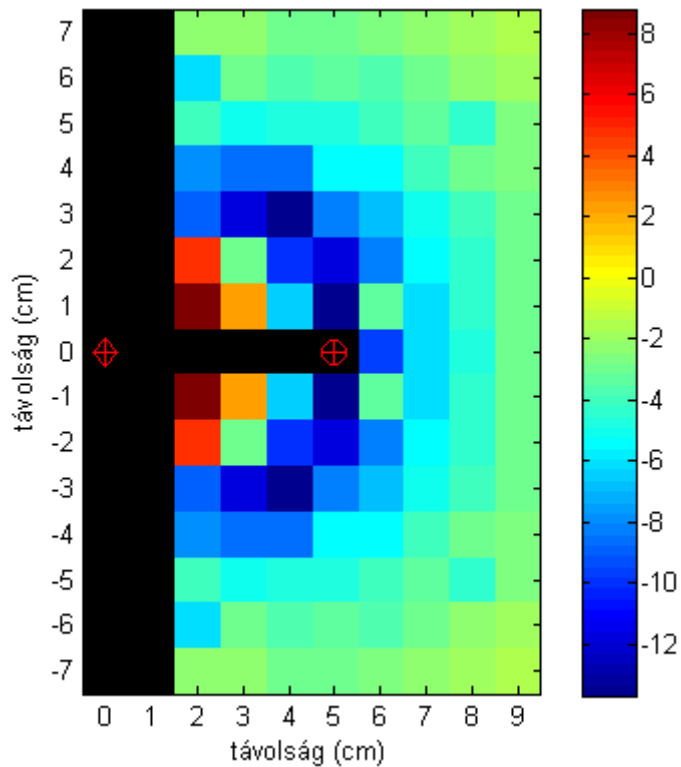
A hangszórót a zajelnyomó rendszer beavatkozájaként, a Nokia 2100-as mikrofont pedig zajmikrofonként használtam. Mindkettőt a DSP fejlesztőkörnyezethez csatlakoztattam a teljesítményerősítő, illetve a mérőerősítő segítségével. A fejlesztőkörnyezetet és a zajcsökkentő algoritmus futtatásával kapcsolatos teendőket az 5. fejezetben részletesen ismertetem.

A mérés során az állványok segítségével a rácsozott papír rögzített pontjain egymástól 5 cm-re helyeztem el a hangszórót és a zajmikrofont a 3.12. ábrán látható módon. Kb. 2 m távolságban helyeztem el a zajforrásnak használt aktív hangfalat, melyre a függvénygenerátorral 300 Hz-es szinusz jelet kapcsoltam. A függvénygenerátor kimenetét a DSP környezet referenciabemenetére is rákapcsoltam.



*3.12. ábra – Akusztikus tér mérésének elrendezése*

Ezt követően a zajszintmérő állványra erősített mérőmikrofonjával cm-es felbontással végigpásztáztam a beavatkozó hangszóró előtti teret, és lejegyeztem a mért zajszintet be- és kikapcsolt aktív zajcsökkentés mellett. A mechanikus kialakítás szimmetriáját kihasználva a mező egyik felének eredményeit rögzítettem, és azokat a másik oldalra tükröztem. Az elnyomási értékeket a Matlab `imagesc` függvényével ábrázoltam (3.13).



3.13. ábra – Zajelnyomás (LSM-50M/NO-B hangszóró, Nokia 2100 mikrofon)

Az elnyomási tér képe a szimulációval kapott eredményeknek megfelelő. 10 dB körüli elnyomási értékeket mértem egy kb. 100°-os körgyűrűkben. A kísérleti eredmények alapján tehát teljesülnek az elképzelt zajcsökkentési elrendezés feltételei.

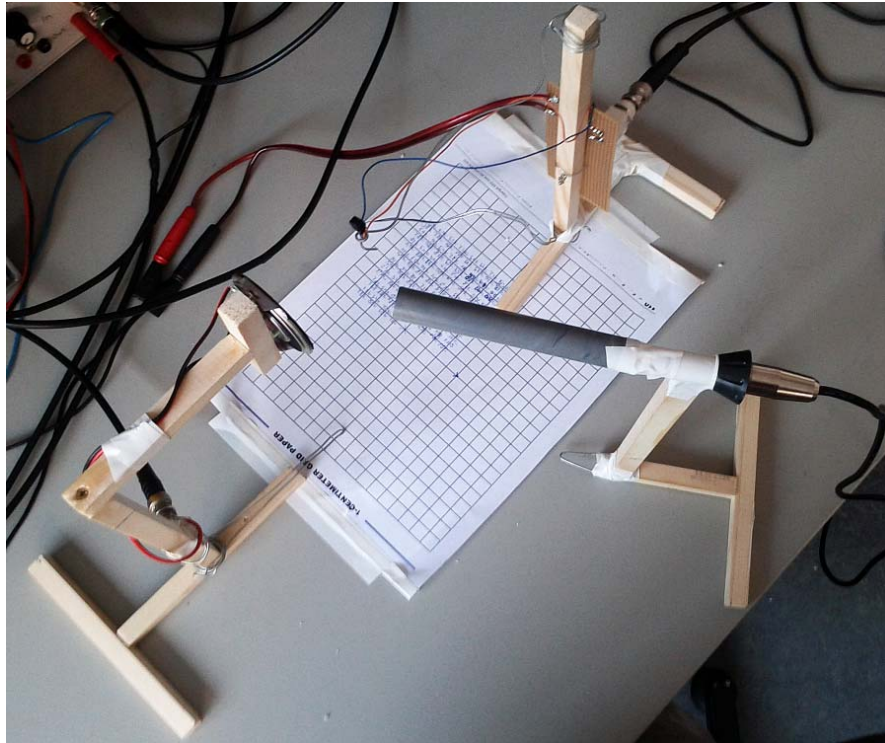
### 3.4. A zajelnyomás érvényesülése zárt csőben

Az elnyomási tér kiterjedésével kapcsolatos vizsgálatoknál szem előtt kell tartani, hogy a felhasználói élményt végső soron a fül belsejében, a dobhártyánál kialakuló zajviszonyok fogják meghatározni.

A zajmikrofon hallójáratban történő elhelyezése ergonómiai szempontok miatt nem jöhet szóba, de erre nincs is feltétlenül szükség. Feltételezhetjük, hogy a hallójárat keresztmetszete nagyjából egyenletes, és akusztikus tulajdonságai egy zárt csőéhez hasonlóak.

Szintén feltételezhetjük, hogy amennyiben a zárt csőből a hanghullámok az elején és végén található nyílásoktól eltekintve nem képesek kilépni, úgy azok csillapítatlanul fognak a csővön végighaladni. Így a cső elejénél található zajviszonyok közel azonosak lesznek a cső végén találhatóakkal. A feltételezés helyességét mérés segítségével ellenőriztem.

A méréshez a 3.3. fejezetben ismertetett elrendezést a 3.14. ábrán látható módon kiegészítettem egy 11 cm hosszú műanyag csővel.



3.14. ábra – Zajnyomás mérése zárt cső végén

A hangszórót és a zajmikrofont az előző fejezetben ismertetettel megegyező módon 5 cm-re helyeztem el egymástól. A mérőmikrofont az elnyomási körgyűrű mentén helyeztem el és lejegyeztem az elnyomás mértékét. Ezt követően a mérőmikrofon végére illesztettem a csövet, és annak végét ugyanoda helyeztem, ahol korábban a mérőmikrofon vége volt, és ismételen lejegyeztem az elnyomás mértékét.

A műveletet úgy is megismételtem, hogy a 11 cm-es csövet egy hungarocell falban helyeztem el. Ennek az volt a célja, hogy az emberi fej mellett kialakuló akusztikus térhez hasonló viszonyok jöjjenek létre.

A mérési eredményeket a 3.1. táblázat tartalmazza.

elnyomás cső nélkül	10 dBA
elnyomás csővel	11 dBA
elnyomás falba ágyazott csővel	10 dBA
elnyomás cső nélkül 11 cm-rel távolabb	1 dBA

3.1. táblázat – Zajnyomás terjedése zárt csőben

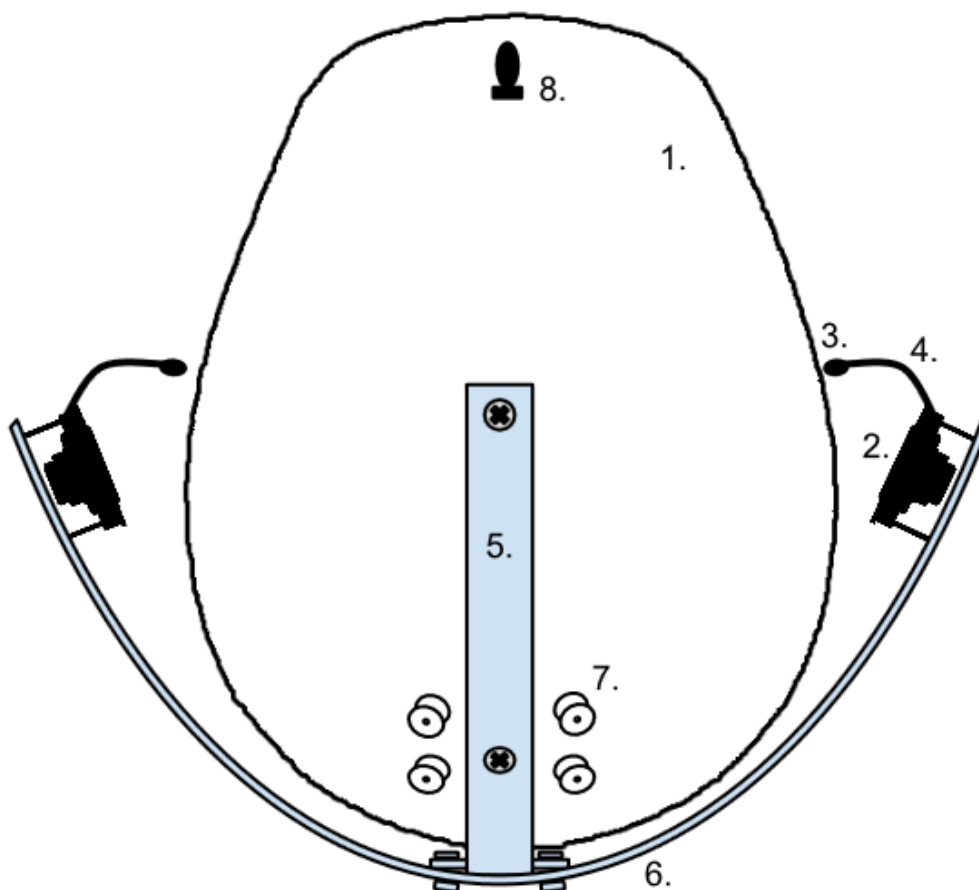
A mérési eredmények alapján megállapítható, hogy a zárt cső „meghosszabbítja” az elnyomási teret. Feltéve ezért, hogy a hallójárat akusztikus viszonyai a zárt csőéhez hasonlóak, elegendő az elnyomási tér fülkagylóig való kiterjedését biztosítanunk.



## 4. A zajcsökkentő eszköz fizikai kialakítása

### 4.1. Az elrendezés ismertetése

A nyílt kialakítású zajcsökkentő eszköz elrendezését a szimulációk és mérések tanulságai alapján a 4.1. ábrán látható módon terveztem meg.



4.1. ábra – A nyílt kialakítású hordozható zajcsökkentő berendezés felülnézeti vázlatja

#### Jelmagyarázat

1. műanyag munkavédelmi sisak
2. Visaton BF-45 hangszóró
3. Nokia 2100 mikrofon
4. hajlítható összeköttetés
5. a sisakhoz rögzített alumíniumpánt
6. állítható magasságú alumíniumpánt
7. BNC csatlakozók
8. referenciamikrofon

Az eszköz kialakításának fő jellemzője, hogy a zajmikrofon és a fül azonos távolságra helyezkednek el a hangszórótól (4.2. ábra). Ily módon kiküszöbölhető az ellenzaj csillapodása miatt bekövetkező teljesítményromlás.



4.2. ábra – A zajmikrofon, a hangszóró és a fül helyzete

A zajmikrofon egy hajlékony rézdrót végén kialakított foglalatban helyezkedik el. Ez robusztusan, de állítható módon rögzíti, így az eszköz tesztelése során lehetőség volt a különböző pozíciók teljesítményre gyakorolt hatásának vizsgálatára. A hallójárat nyílása és a zajmikrofon közti  $\alpha$  szög kb.  $30^\circ$ -ra is kényelmesen beállítható, így a 3.9. ábrán bemutatott,  $45^\circ$ -ra vonatkozó teljesítménycsökkenés kevésbé érvényesül.

A hangszórókat távtartók segítségével rögzítettem a fej körül elhelyezkedő, pánton (6). Az (6)-os pántot csavarok segítségével csúsztatható módon szorítottam az (5)-ös pánthoz, melyet a sisakba fúrt lyukakban elhelyezett csavarokkal rögzítettem.

A zajmikrofonok és hangszórók közvetlenül összeköttetésben állnak a BNC aljzatokkal (7). A referenciamikrofon (8) nincs rögzítve a sisakon, az ábrán csak az egyik lehetséges elhelyezését láthatjuk. Éppen ezért BNC csatlakozó sem tartozik hozzá. A mérések során általában egy csíptethető mérőmikrofont használtam, amelyet a sisaktól függetlenül, vagy a sisakon több különböző pozícióban helyezhetünk el. A referencia vételezésének módját a 6.1 fejezetben vizsgálom részletesebben.

## 4.2. Az alkatrészek ismertetése

### A munkavédelmi sisak

A 4.3. ábrán látható munkavédelmi sisak merev váza kellő tartást biztosított az eszközök szilárd rögzítéséhez.



4.3. ábra – A felhasznált munkavédelmi sisak

A sisak külső héja és merev „bélése” közötti rés lehetővé tette a BNC aljzatok és a hozzájuk kapcsolt vezetékek elhelyezését.

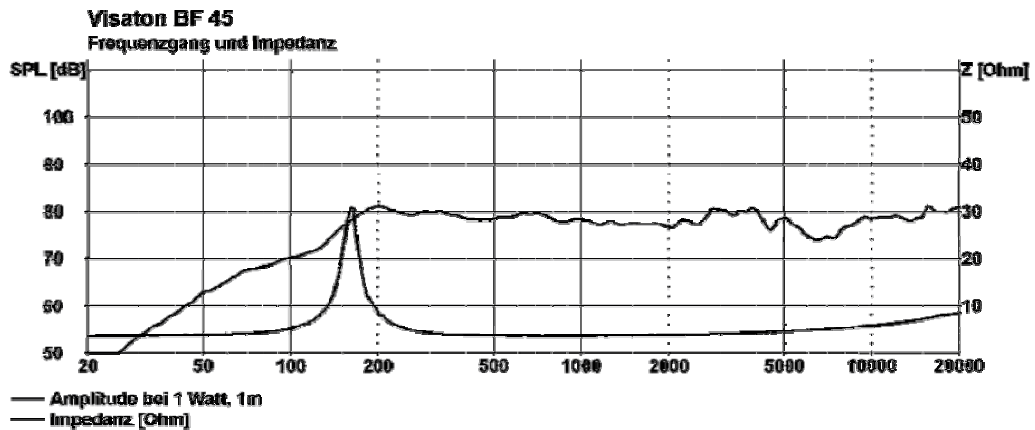
#### A hangszórók

Az első zajelnyomási tesztek során a LSM-50M/NO-B alkalmatlannak bizonyult a feladatra a 250 Hz alatt tapasztalt rossz átvitele miatt. Az aktív zajcsökkentés elsődleges feladata az alacsony frekvenciájú zajok elnyomása, így erre alkalmas hangszórót kellett választani.

A 4.4. ábrán látható Visaton BF 45 hangszóró speciális kialakításának és alumínium membránjának köszönhetően a 4 cm-es hangszórók között kiemelkedően jó alacsony frekvenciás átvittel rendelkezik (4.5. ábra).

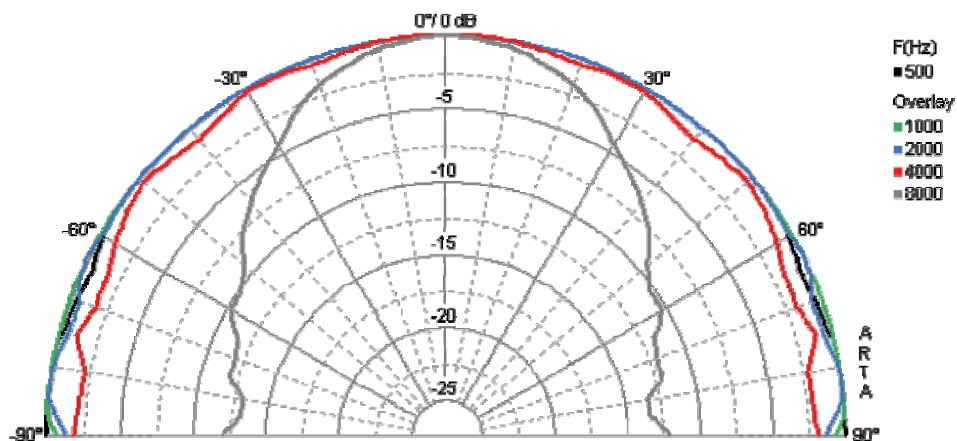


4.4. ábra – Visaton BF 45



4.5. ábra – A Visaton BF45 frekvenciamenete

A hangszóró -10 dB-es vágási frekvenciája 90 Hz, az LSM-50M/NO-B esetében ez az érték 250 Hz. A mérések során bebizonyosodott, hogy a hangszóró alkalmas 90 Hz-es zajok elnyomására is.



4.6. ábra – A Visaton BF45 iránykarakterisztikája

A 4.6. ábrán látható hogy a hangszóró 4 KHz-ig az iránykarakterisztikára vonatkozó követelményt is teljesíti.

### A mikrofon

A mikrofonnal szemben támasztott követelmény elsősorban a minél kisebb méret volt. Ez teszi lehetővé, hogy a mikrofont közel helyezhessük a fülhöz anélkül, hogy a mikrofon teste a körülötte kialakuló elnyomási teret jelentősen megváltoztatná. Az általános célokra szánt mikrofonok jellemző mérete általában 1 cm, a mobiltelefonokban használt eszközök viszont ennél jóval kisebbek.



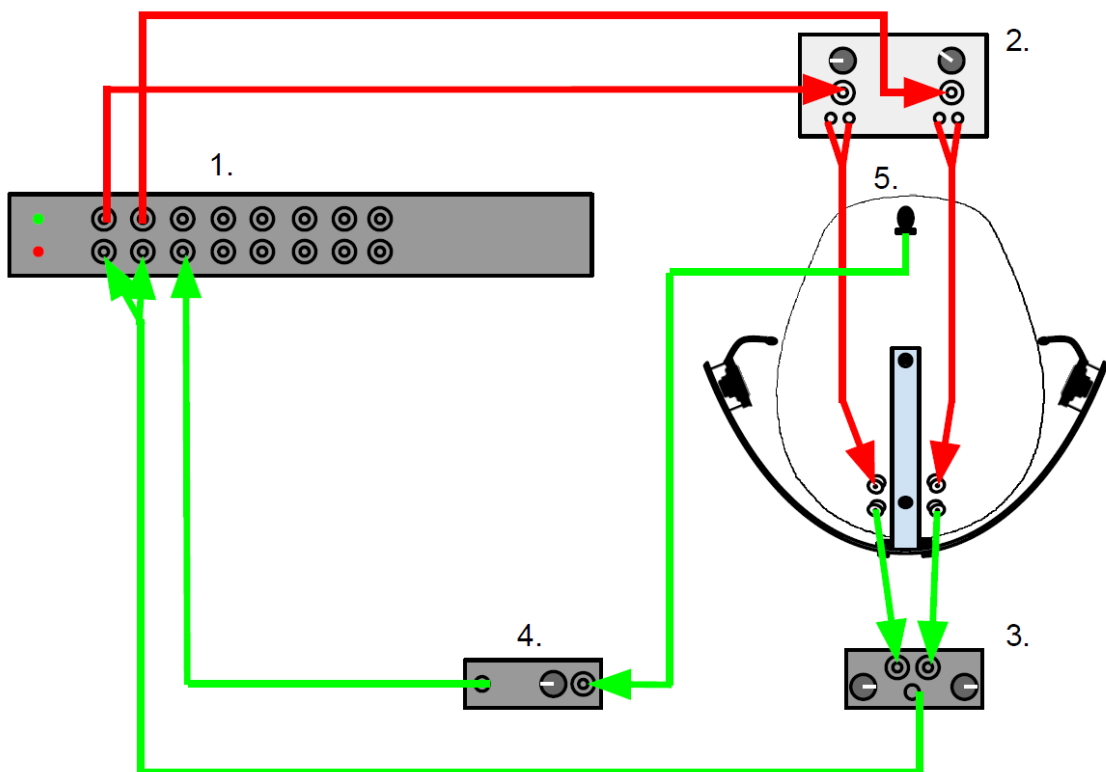
4.7. ábra – Nokia 2100 mikrofon

A 4.7. ábrán látható Nokia 2100 telefonhoz kapható tartozékmikrofon egy 5 mm átmérőjű elektret mikrofon. Méretéből adódóan ideális választásnak tűnt a feladathoz, a mérések során pedig átvitele is megfelelőnek bizonyult széles frekvenciatartományban.

Referenciamikrofonként általában egy a DSP laborban található mérőmikrofont használtam, melynek átvitele a zajcsökkentés működési tartományban lineárisnak tekinthető.

#### A zajcsökkentő elektronika

A sisakot árnyékolt BNC kábelekkel csatlakoztattam a többi eszközhöz. Ezek közé tartozik a DSP labor egy sztereo teljesítményerősítője, egy sztereo mikrofon-előerősítője és az ADSP-2126x jelprocesszorra épülő fejlesztőkörnyezete. A mérések során ellenőrzési célból egy oszcilloszkópot is felhasználtam. Az eszközök tesztek során általánosan alkalmazott összeköttetéseit mutatja be a 4.8. ábra.



4.8. ábra – Az eszközök bekötésének rendje

### Jelmagyarázat

1. 8 csatornás DSP fejlesztőkörnyezet; felső sor: kimenetek, alsó sor: bemenetek
2. kétcsatornás teljesítményerősítő; RCA bemenetek, banán kimenetek
3. kétcsatornás mikrofon-előerősítő; RCA bemenetek, sztereo jack kimenet
4. egycsatornás mikrofon-előerősítő; RCA bemenet, jack kimenet
5. referenciamikrofon

A zajmikrofonok erősített kimenetét egy elosztó segítségével egy oszcilloszkópra is rákötöttem. Ennek segítségével azonnali visszajelzést kaphattam a zajmikrofonnál lévő zajviszonyokról.

## 5. Az NFXLMS algoritmus gyakorlati megvalósítása

### 5.1. Hardveres megvalósítás

Az NFXLMS algoritmust az Analog Devices ADSP-2126x jelfeldolgozó processzorára és négy kétcsatornás AD73322 AD/DA átalakítójára épülő fejlesztőkörnyezetének segítségével futtattam.

A rendszer egy szabványos 19 colos rackben foglal helyet, melynek az elején található 16 RCA aljzat, mellyel a rendszer nyolc be-, illetve kimenetéhez csatlakozhatunk. A szoftveres megvalósítás limitációit is figyelembe véve a bemeneti jeleknek a 0,7 VPP szinten belül kell maradniuk.

#### 5.1.1. ADSP-2126x

A 2126x a SHARC architektúrára épülő, 200 MHz-es, 32 bites lebegőpontos jelfeldolgozó egység, mely integráltan tartalmaz minden olyan eszközt, amely egyszerű jelfeldolgozási feladatok megvalósításához szükséges (*system-on-a-chip*).

Két függetlenül működő lebegőpontos végrehajtó egységgel rendelkezik, melyek mindegyike külön szorzót, ALU-t, shiftert és adatregisztereket tartalmaz. Az architektúra SIMD utasításokat is tartalmaz, melyek egyszerre két adaton tudják elvégezni ugyanazt a műveletet. Így egyszerre négy adatsor párhuzamos feldolgozására nyílik lehetőség, a legtöbb művelet pedig (pl. MAC) egyetlen rendszerciklus alatt végrehajtható.

DMA vezérlőt is tartalmazó I/O processzora SPI és sorosporti kommunikációt is támogat.

Az eszköz felprogramozását és az alkalmazások futás közbeni ellenőrzését a JTAG porton keresztül lehet elvégezni.

Az eszköz integrált SRAM-ot is tartalmaz, mely adat- és programblokkra van osztva. Bármelyik blokkban tárolhatunk adatot és utasítást is, de a Harvard-architektúra sebességbeli előnyeit ezek szeparálásával aknázhatjuk ki. Mindkét blokk dual-port kialakítású, így egyetlen cikluson belül függetlenül kezelheti őket a központi- és az I/O processzor.

Az eszköz az IEEE szabványos, 32 bites lebegőpontos számábrázolási formátumát alkalmazza. A lebegőpontos architektúra előnye, hogy ésszerű határokon

belül nem kell foglalkozni a programváltozók nagyságrendjével, a számítás precizitása ugyanis ettől független. A kiterjesztett, 40 bites lebegőpontos számábrázolás is támogatott.

A 2126x-os dokumentációja által megemlített egyéb tulajdonságok (duális címképzők, cirkuláris bufferek, speciális elágazáskezelés) [7] a DSP-kre jellemző módon mind a jelfeldolgozási célú kódok minél nagyobb végrehajtási sebességét szolgálják.

### **5.1.2. AD73322**

Az AD73322 egy 16 bites, kétcsatornás, szigma-delta AD kodek. Mintavételi sebességét 8, 16, 32 és 64 kHz-re lehet beállítani. Sorosporti interfész teszi lehetővé a programozható eszközökkel való kommunikációját.

Legfeljebb négy kodek kaszkádosítható, ekkor sorosporti kapcsolaton keresztül egyetlen 8 csatornás kodekként kezelhetők. A felhasznált DSP fejlesztőkörnyezetben is ebben a konfigurációban kapcsolódnak az ADSP-2126x jelprocesszorhoz.

## **5.2. Szoftveres implementáció**

A VisualDSP++ egy integrált fejlesztői és tesztkörnyezet, mely rendkívül hatékony fejlesztést tesz lehetővé. A programok a JTAG porton keresztül telepíthetők a DSP-re, futásuk bármikor felfüggeszthető, memóriaképük megtekinthető és módosítható.

Az általam használt NFxLMS algoritmust implementáló zajcsökkentési programot Orosz György írta, a DSP környezet inicializálását végző kódot pedig Bogár István és Bilau Zoltán készítette.

A program a 6. ábrán bemutatott struktúrát valósítja meg legfeljebb 8 beavatkozó hangszóró és összesen 8 zajmikrofon vagy referenciajel segítségével. Az eszközök számának nyilvánvalóan korlátot szab a rendszer fizikai kialakítása (8 AD/DA csatorna), a DSP véges számítási kapacitása ugyanakkor még ennél is kevesebb eszköz kezelését teszi csak lehetővé.

A projekt egyik header fájljában (`tt.h`) beállítható a bemeneti és kimeneti csatornák, valamint a referenciajelek száma. Bár az NFxLMS algoritmus projektbeli implementációja tetszőleges beállítás mellett működőképes, a projekt más részei tartalmaznak további megkötéseket. Egyszerű paramétermódosításokkal ezért legfeljebb két zajmikrofon, két hangszóró és egy referenciajel kezelésére van lehetőség.



A mérések nagyobb részénél (ld. 3.3. fejezet) csak egycsatornás konfigurációt alkalmaztam, vagyis egy zajmikrofont, egy beavatkozót és egy referenciajelet használtam.

Ugyanezen fájlban lehet beállítani az adaptív szűrők ( $H$ ) és a modellező szűrők ( $\hat{A}_2$ ) fokszámát. Ezt kellően nagyra kell állítani ahhoz, hogy az elsődleges és másodlagos utak átvitelét kellő pontossággal tudják reprezentálni, ugyanakkor túl nagyok sem lehetnek, mert akkor a velük kapcsolatos számítások mennyisége meghaladná a DSP kapacitását.

A DSP soros porton keresztül kommunikál a kaszkádosított AD/DA egységekkel. A szoftver működését ez a kommunikáció ütemezi. A program `main` függvénye egy végtelen ciklusban figyeli, hogy érkezett-e be újabb adat, és ha igen, lefuttatja az NFxLMS-t megvalósító `process` függvényt.

A projektben található a hardveres inicializálásért felelős fájlok is. A `codec_ad73322.c` fájlban az AD kodekkel kapcsolatos kódok találhatóak.

A program számításigényének legjelentősebb részét a szűrési műveletek teszik ki. Minden beavatkozóhoz külön adaptív-, és minden másodlagos átviteli úthoz külön modellező szűrő tartozik. Egy 2x2-es rendszer esetében ez összesen 6 szűrőt jelent. A FIR szűrőkkel való szűrés a jel szűrőegyütthatókkal való konvolúcióját jelenti. A DSP nyújtotta párhuzamosítási lehetőségek maradéktalan kihasználásának érdekében a konvolúciót megvalósító függvény assemblyben íródott.

A programnak két eltérő működési módja van, melyek között a DSP kártya fizikai kapcsolóival válthatunk.

Identifikációs módban a másodlagos út meghatározása történik a modellező szűrő LMS algoritmussal történő adaptálása segítségével. A program ilyenkor fehérzajt állít elő, mely egyszerre szolgál referenciajelként és a hangszórók meghajtásaként. Két mikrofon és két hangszóró között négy másodlagos átviteli út adott. A program egyszerre egy hangszórót működtet, miközben adaptálja a hozzá tartozó két másodlagos utat. A hangszórók között hardverkapcsolókkal válthatunk.

Zajelnyomási módban az elsődleges utat modellező szűrő ( $H$ ) adaptációja zajlik, a másodlagos utat modellező szűrő együtthatói ilyenkor már nem változnak. Ezért a továbbiakban az elsődleges úthoz tartozó szűrőt egyszerűen adaptív szűrőnek, a másodlagos úthoz tartozó szűrőt pedig modellező szűrőnek nevezem.

## A programon végzett módosítások

A program eredetileg 8 kHz-es mintavételi frekvencián működött, a kísérletek során ugyanakkor ennek késleltetése túl nagyak bizonyult (bővebben ld. 6.2 fejezet). Az AD átalakító konfigurációs fájlját ezért makrókkal egészítettem ki, amelyek segítségével könnyen lehet váltani 8, 16 és 32 kHz-es mintavételi frekvenciák között. A makrók az AD kodek inicializációs vektorait módosítják.

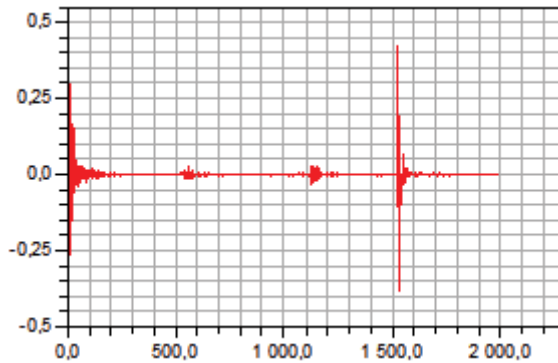
A nagyobb mintavételi sebesség nagyobb adatforgalmat is jelent, ezért a soros port jelzési sebességének az arányos növelésére volt szükség.

Sajnos a mintavételi frekvencia növelése összeegyeztethetetlen követelményeket támaszt az adaptív szűrők fokszámával szemben. Mivel a rendszer működési sávszélessége a Nyquist-tételnek megfelelően növekedik, ezért bonyolultabb átviteli utakat kell modellezni. A gyakoribb mintavétel viszont azzal jár, hogy az egyes minták feldolgozására kevesebb idő áll rendelkezésre. Így több számítást kellene elvégezni rövidebb idő alatt.

Erre a problémára sajnos nincs megoldás. A lehető legnagyobb fokszámokat állítottam be, amelyekkel a program futási ideje még belefért a két minta beérkezése közti időbe. 2x2-es elrendezés esetén 32 kHz-en így legfeljebb 90 együtthatós adaptív- és 200 együtthatós modellező szűrők alkalmazására volt lehetőség. A tesztek során tapasztalt gyenge hatékonyság és gerjedésre való hajlam azonban arra utalt, hogy ennél hosszabb szűrőkre van szükség.

A program eredeti változata a zajcsökkentési feladat két hangszóróra és két zajmikrofonra vonatkozó általános megoldását tartalmazta. Ez négy másodlagos út számontartását, és mindkét adaptív szűrő módosításánál mindkét zajmikrofon jelének figyelembe vételét jelenti.

Az általános megoldásból semmiféle megkötés nem következik a hangszórók és zajmikrofonok elhelyezésére vonatkozóan. A sisakon elhelyezett eszközök ugyanakkor egy speciális esetet képeznek, ahol a bal és jobb oldal eszközei egymástól függetlenül, két 1x1-es zajcsökkentési algoritmussal is kezelhetők. Ennek az észrevételnek a jogossága sejthető a 3.4-es szimulációs ábrából. Ezen világosan látszik, hogy az egyes hangszórók hatása csak azok közvetlen környezetében érvényesül. A keresztutak (bal mikrofon – jobb hangszóró) elhanyagolásának lehetőségét a 2x2-es rendszer modellezőszűrő-együtthatóinak vizsgálata is megerősíti.



5.1. ábra – A modellező szűrők együtthatói 2x2-es rendszer esetén

Az 5.1. ábrán a 8 kHz-es üzemmód során adaptált 500 együtthatós modellező szűrők együtthatói láthatók. Az együtthatók egy 2000 lebegőpontos számot tartalmazó egybefüggő memóriaterületen találhatók. Az első 500 elem tartozik az 1. mikrofon és az 1. hangszóró közötti úthoz (bal oldal). A következő 1000 elem tartozik a keresztutakhoz (1. mikrofon – 2. hangszóró, 2. mikrofon – 1. hangszóró), az utolsó 500 elem pedig a jobb oldali főúthoz.

A rendszer itt stabilan, jó hatásfokkal működött, így szűrői feltehetően megfelelően reprezentálták az egyes utak átviteleit. Jól látható hogy a keresztutakhoz tartozó szűrők együtthatói elhanyagolhatóak a főutakéhoz képest.

Jelentős számításmennyiség megtakarítható a keresztutak elhanyagolásával. A program apró módosításával kihagytam a hozzájuk tartozó szűrési feladatokat. Ezt követően már 170-es fokszerű adaptív- és 250-es fokszerű modellező szűrők alkalmazása is lehetővé vált 32 kHz-es mintavételezési frekvencia mellett. Az ezt követő mérések során a rendszer késleltetése, stabilitása és hatásfoka egyaránt kielégítőnek bizonyult.

## **6. Az eszköz paramétereinek működésre gyakorolt hatása**

A zajcsökkentő eszközök hatékonysága nagyban függ a referenciajel és a kioltandó zaj korrelációs viszonyaitól. A referenciajel megválasztása ezért egy önálló vizsgálatra érdemes probléma, amely ugyanakkor nem függetleníthető az eszköz fizikai jellemzőitől és működési tulajdonságaitól.

A berendezés összeszerelése és a zajcsökkentő algoritmus implementálása után még mindig foglalkozni kell a működési paraméterek helyes megválasztásával. A fejezetben ismertetem a legfontosabb jellemzők működésre gyakorolt hatását.

### **6.1. A referenciajel vételezése**

Sztochasztikus zajok elnyomásához a referenciajelnak két kritériumnak kell eleget tennie. Minél nagyobb mértékben korrelálnak kell lennie a zajjal, és időben meg kell előznie azt.

Az első kritérium akkor teljesíthető a legkönnyebben, ha a referencia a zajelnyomó berendezéshez minél közelebb elhelyezett mikrofonról származik. A fejhallgatókon is ezzel a megoldással találkozunk. A referenciamikrofontól a zajmikrofonig vezető elsődleges út ekkor egyszerű, a távoli felületekről érkező visszaverődések nem fognak szelektíven csak az út egyik végén jelentkezni.

A második követelmény szempontjából az a szerencsés, ha a zajelnyomó eszköz és a zajforrás között minél nagyobb a távolság, és a referenciamikrofon a zajforráshoz közel helyezkedik el. Elektronikus eredetű zaj esetén mikrofon alkalmazására sincs feltétlen szükség, a jelet magából a berendezésből is vételezhetjük.

Ez utóbbi megoldással a zajcsökkentés szelektivitását is növelhetjük. Ha egy üzemben szeretnénk az ott tartózkodókat megvédeni egy hangos gép zajától úgy, hogy egymás közötti kommunikációjukban és a figyelmeztető jelzések észlelésében ne gátoljuk őket, akkor célszerű az adott géphez minél közelebb elhelyezni a mikrofont. Minél távolabbról érkezik az elektronikus referenciajel, annál több időnk van az egyes minták feldolgozására, így bonyolultabb, nagyobb hatékonyságot eredményező számításokat is előírhatunk. A nagyobb távolság viszont bonyolultabb elsődleges utat eredményez, így a referencia forrásának megválasztását gondosan mérlegelni kell.

A következőkben ismertetett mérés során megvizsgáltam, hogy milyen hatással van a sisak zajelnyomási teljesítményére a referenciamikrofon helyzetének megválasztása.



*6.1. ábra – A zajcsökkentő sisak mérési elhelyezése*

A mérés során a 4.8. ábrán bemutatott elrendezést használtam. A 6.1. ábrán látható a sisak, melyet a 2.2.1.-es fejezetben bemutatott hungarocell műfejre helyeztem. A fül helyére a Voltcraft SL-400-as zajszintmérő mikrofonját helyeztem el.

A sisaktól 2 m-re helyeztem el a HO1-3722A zajgenerátorral meghajtott aktív hangfalat.

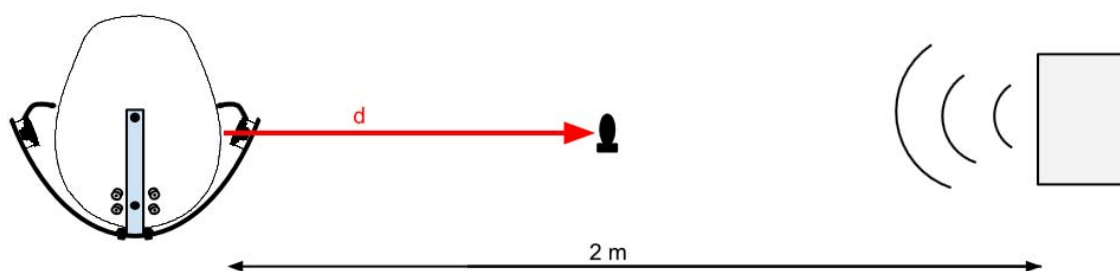
A mérés során a referenciamikrofont a zajforrástól indulva fokozatosan közelítettem a sisakhoz, és minden pontban feljegyeztem a zajmérővel mérhető elnyomási értékeket különböző sáv szélességű sztochasztikus zajok esetén.

A 200-2500 Hz közötti szinuszos zajok esetén 10 dBA fölötti elnyomást mértem a referenciamikrofon helyzetétől függetlenül. A rendszer tehát jól működik minden periodikus jelre, ami ebbe a tartományba esik, így a fejezetben nem foglalkozom periodikus jelek további vizsgálatával.

A mérést több különböző paraméterválasztással is elvégeztem, melyet az egyes mérések előtt táblázatos formában foglalok össze. A 2x2-es konfiguráció a keresztutak hatását is figyelembe vevő általános megoldás (ld. 5.2. fejezet), a 2x1-es konfiguráció pedig a keresztutakat figyelmen kívül hagyó, módosított algoritmust jelenti.

<b>1. mérés</b>	
mintavételi frekvencia	8 kHz
modellező szűrők fokszáma	500
adaptív szűrők fokszáma	800
zajcsökkentés konfigurációja	2x2

A mérés során vizsgált referenciamikrofon-pozíciók a 6.2. ábrán láthatók, ahol  $d$  a zajmikrofon és a referenciamikrofon távolságát jelöli.



6.2. ábra – A referenciamikrofon távolságának hatását vizsgáló mérés

sávsz.	5 cm	10 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	1 m	1,6 m	1,9 m
0,5 kHz	1	1	2	5	5	5	5	6	5
1,5 kHz	0	0	0	1	1	2	2	1	2

6.1. táblázat – Sztochasztikus zaj-elnymás a referenciamikrofon sisaktól való távolságának függvényében [dBA]

A mérési eredményeket a 6.1. táblázat tartalmazza. Világosan látszik, hogy a 30 és 40 cm közötti távolságot meghaladva a rendszer teljesítménye ugrásszerűen javul. Ez a zajelnyomás folyamatos működtetése és a referenciamikrofon lassú, folyamatos mozgatása során is megfigyelhető volt.

A jelenség a jelfeldolgozó rendszer késleltetésével magyarázható. Annak érdekében, hogy a referenciajel szűrje időben megjelenjen a zajmikrofon helyén, a referenciamikrofonnak legalább 40 cm-es távolságban kell elhelyezkednie a kioltás helyétől.

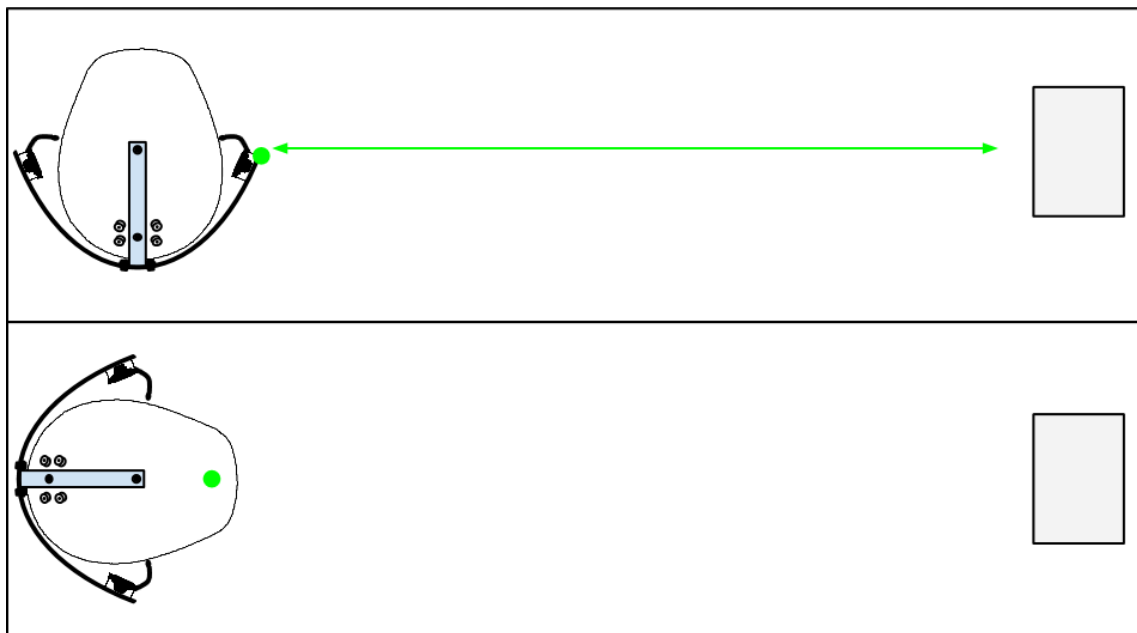
Az egyes minták feldolgozásának időtartama  $1/8000$  s-nél kisebb, mely idő alatt a hang csupán 4 cm-t tesz meg. A teljes rendszer késleltetésének nagyobb része a szigma-delta átalakítók működéséből adódik.

Az 1. mérés során megválasztott paraméterekkel a rendszer alkalmatlan a referenciamikrofon sisakon való elhelyezésére. A mikrofont a sisak elején, vagy annak tetején elhelyezve sem tapasztaltam értékelhető mértékű zajelnyomást.

Az AD73322 kodek dokumentációja [7] kiemeli, hogy a mintavételezési sebesség megválasztása a kodek valamennyi részének natív működési sebességére kihatással van, így magasabb mintavételi frekvenciával jelentősen alacsonyabb késleltetést érhetünk el. Az 1. mérés tapasztalatai miatt döntöttem ezért az eredeti zajcsökkentési program kismértékű módosítása, és a mintavételi frekvencia növelése mellett (ld. 5.2. fejezet).

2. mérés	
mintavételi frekvencia	32 kHz
modellező szűrők fokszáma	170
adaptív szűrők fokszáma	250
zajcsökkentés konfigurációja	2x1

A mintavételi frekvencia növelésének hatására a referenciamikrofont a sisakhoz közel helyezve is hatásos maradt a zajelnyomás. A 6.3. ábrán zöld színnel jelölt helyeken elhelyezve a referenciamikrofont 5-6 dBA-s elnyomást mértem 500 Hz-es, és 1-2 dBA-s elnyomást 1,5 kHz-es sáv szélességű sztochasztikus zaj esetén.



6.3. ábra – A referenciamikrofon elhelyezési lehetőségei

32 kHz-es mintavételezési frekvencia mellett a 6.4. ábrán látható módon közvetlenül a beavatkozó mögé csiptetett referenciamikrofon esetén is sikeresen csillapította a sztochasztikus zajokat a rendszer.



*6.4. ábra – A referenciamikrofon elhelyezése a fül mellett*

Ez a választás ugyanakkor kissé instabilnak bizonyult, mert a beavatkozó hangszóró közelsége miatt az ellenzaj is megjelent a referenciajelben, amely a struktúra alkalmankénti begerjedéséhez vezetett.

Természetesen csak azoknak a zajoknak a szűrésére van lehetőség, amelyek a referenciamikrofon által kijelölt irányból érkeznek, így a referenciajel időbeli elsősége teljesül rájuk.

A felhasználóval szemben elhelyezkedő zajforrások zajának szűrését teszi lehetővé a 6.4. ábrán javasolt elrendezés.



*6.4. ábra – Egy referenciamikrofon optimális elhelyezése*



## 6.2. A mintavételi frekvencia

A mintavételi frekvencia egyrészt hatással van a rendszer késleltetésére (ld. előző fejezet), másrészt felső korlátot szab működési sávszélességére.

A Nyquist-tétel értelmében  $f_s$  mintavételi frekvencia esetén elméletileg is legfeljebb az  $f_s/2$  frekvenciájú komponensek visszaállítására van lehetőség.

A mintavételi frekvencia korlátozó hatását a szinuszos zavarok elnyomásának vizsgálatánál lehet a legjobban megfigyelni. A szinuszos zajok elnyomásának mérésénél 4 kHz-es mintavételi frekvencia mellett kb. 10 dB-es elnyomást tapasztaltam egészen 1800 Hz-es zajokig. 2000 Hz-nél az elnyomás 0 dB-re csökkent.

A mintavételi frekvencia 8 kHz-re emelését követően 2500 Hz-ig érvényesült a 10 dB-es elnyomás (a fülnél tapasztalható viszonyokat mérő mérőmikrofonnál), és egészen 3800 Hz-ig képes volt csökkenteni a rendszer a zajmikrofonnál érzékelhető zajt.

A szélesebb átviteli sáv a szélessávú sztochasztikus zajok elnyomásában is elméleti előnyt jelent, a gyakorlatban azonban nem tapasztaltam mérhető különbséget a 4 kHz-es és 8 kHz-es mintavételezési különbségek között. A 1,5 kHz sávszélességű sztochasztikus zajok elnyomása mindkét esetben 2 dB-nek adódott.

Személyes tapasztalatok alapján a 3 kHz-es szinuszos zajok elnyomása a  $\lambda/4$ -nél nagyobb távolság miatt a fülben már nem érzékelhető, 5 kHz-nél pedig elnyomás helyett a zaj határozott erősödését tapasztaltam. A sztochasztikus zajok elnyomásának mintavételi frekvenciától való függetlensége valószínűleg abból adódik, hogy az átviteli modell 2 kHz fölötti komponensek által megkívánt részletessége nem elégséges.

Ezért megállapítható, hogy a mintavételi frekvencia az elnyomás mértékében nem korlátozó tényező. Amennyiben megengedhető a referenciamikrofon és a sisak közötti nagyobb távolság, célszerű magasabb fokszámú szűrőket választani alacsonyabb mintavételi frekvencia mellett. Számomra a kompaktság volt az elsődleges követelmény, ezért 32 kHz-es frekvencián üzemel a rendszer lehetővé téve a referenciamikrofon sisakon történő elhelyezését.

## 7. Az optimális elrendezés jellemzőinek mérése

A félév során elvégzett szimulációk és mérések segítségével sikerült meghatározni, hogy melyek egy kétbeavatkozós, két zajmikrofonos és egy referenciamikrofonos, kompakt, hordozható, egyéni zajcsökkentő berendezés optimális paraméterei.

A fizikai kialakítást a 4. fejezetben már ismertettem, a 7.1. táblázat az eszköz további fontos tulajdonságait foglalja össze.

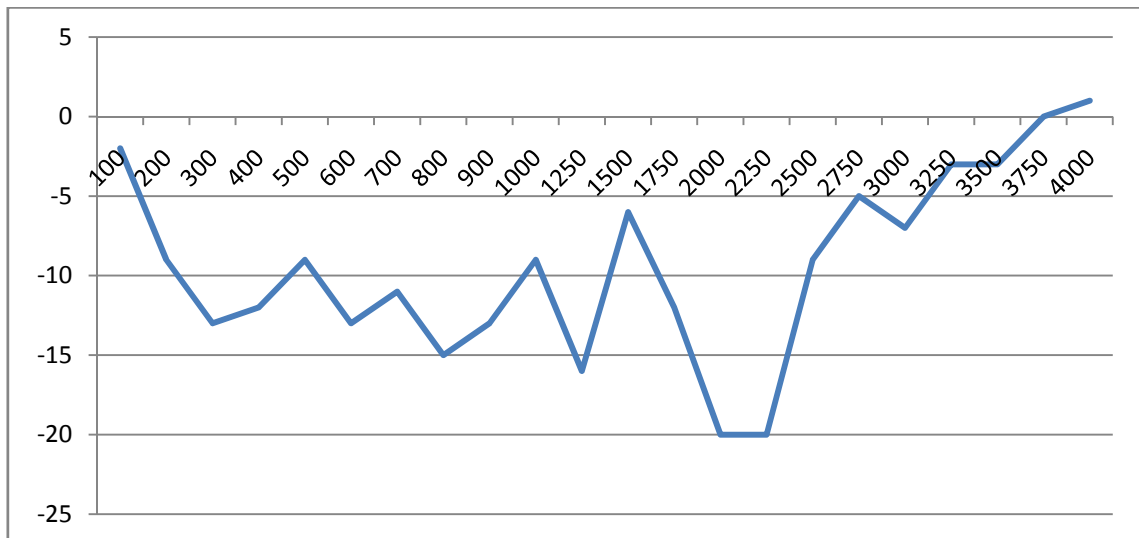
mintavételi frekvencia	32 kHz
modellező szűrők fokszáma	170
adaptív szűrők fokszáma	250
zajcsökkentés konfigurációja	2x1 (keresztutak elhanyagolva)
referenciamikrofon helye	középen, a sisak sildjén

7.1. táblázat – A zajcsökkentő elektronika jellemzői

A következőkben az eszköz zajelnyomási teljesítményével kapcsolatos mérések eredményeit ismertetem. A mérésekhez a korábban bemutatott műfejet és digitális zajszintmérőt használtam fel. A sisakot a műfejre helyeztem, és 2 m távolságban elhelyezett aktív hangszóróval szinuszos és sztochasztikus zajokat állítottam elő, majd rögzítettem az elnyomási értékeket.

### 7.1. Zajelnyomás szinuszos zajokra

A tiszta szinuszos zajok elnyomásának mérési eredményei a 7.1. ábrán láthatók.



7.1. ábra – Elnyomás szinuszos zajok esetén (dB)

Az eszköz kiegyensúlyozott teljesítményt mutat, 200 Hz és 2500 Hz között 10 dB fölötti elnyomást produkál. Egészen 3500 Hz-ig hatásos, 4000 Hz-nél azonban már növeli a zajt.

Az eszköz sokkal jobban teljesít a fejhallgatóknál. Feltehetően a digitális működési elvből adódik, hogy mentes a fejhallgatóknál 1000 Hz környékén tapasztalt erőteljes kiemelési jelenségtől.

## 7.2. Zajelnyomás sztochasztikus zajokra

Az eredményeket a 7.1. táblázat tartalmazza.

Sávszélesség	Elnyomás
0,5 kHz	5 dBA
1,5 kHz	2 dBA

7.2. táblázat – A sisak zajelnyomása sztochasztikus zajokra

Az eszköz az AMP fejhallgatójáéval azonos teljesítményt nyújt, a Sony termékénél pedig jobbat.

## 7.3. A felhasználói élmény szubjektív értékelése

A sisak viselése kényelmes, a fül környékét teljesen szabadon hagyja. Szinuszos zajok esetén egészen 3000 Hz-ig nagyon jelentősen csökkenti a hangosságérzetet.

Az 500 Hz-es sávszélességű sztochasztikus zaj elnyomásában jobban teljesít a Sony fejhallgatójánál, nem tűnik azonban annyira hatásosnak, mint az AMP fejhallgatója. Ennek egyik oka a passzív szigetelés hiánya lehet, amely a fejhallgató esetében csillapítja azokat a zajokat, amelyekre az aktív elnyomás nem érvényesül.

Nyilvánvalóan a fejhallgatónál tapasztalt irányérzékenység is jelen van, a zajforrástól való elfordulás esetén a hangosságérzet növekszik, az elnyomás hatékonysága jelentősen lecsökken.

## 7.4. A rendszer fogyasztása

Dolgozatom vizsgálatának középpontjában az egyéni zajcsökkentő eszközök akusztikai és jelfeldolgozási problémái állnak. Mivel azonban az egyéni zajcsökkentés egyik fontos aspektusa a mobilitás, a megvalósíthatóság kérdésének tisztázása érdekében a fogyasztással is foglalkozni kell.

A hangszórókat meghajtó teljesítményerősítő fogyasztása üresjáratban 1,6 W. A hangszórók erőteljes külső zajok elnyomása során ezen felül kb. 1 W teljesítményt

vesznek fel. A DSP fejlesztőkörnyezet fogyasztását a jelprocesszor tipikus fogyasztásának kétszeresével becsülöm, mely 0,5 W-nak adódik. [9]

Egy 12 Wh-s Li-ion akkumulátor tömege kb. 150 g, melyet még a felhasználói komfort megzavarása nélkül is el lehetne helyezni a sisakon. Az elnyomás közben összesen felvett 3,1 W-os teljesítménnyel számolva egy ilyen akkumulátor kevesebb, mint 4 óráig tudná működtetni a zajcsökkentő eszközöket.

Egy hordozható munkavédelmi eszköztől elvárható, hogy legalább egy 8 órás műszakot kibírjon egyetlen feltöltéssel. A speciális követelményeknek megfelelő hangszóró fogyasztásán nem lehet spórolni, a rossz hatásfokú, magas üresjáratú fogyasztással rendelkező teljesítményerősítőnél és a hétéves jelprocesszornál biztosan találunk takarékosabbat.

Így tehát reálisan kitűzhető cél a teljesítményerősítő és a DSP együttes fogyasztásának 0,5 W-ra csökkentése, amellyel biztosítható a 8 órás üzemidő. Ennek gyakorlati megvalósítása azonban már nem képezi a dolgozat vizsgálatának tárgyát.

## Összefoglalás, kitekintés

Az aktív zajcsökkentés alap gondolatának egyszerűsége ellenére az ilyen berendezések tervezése során számos megoldandó probléma felmerül. Ezeket részben az átviteli utak bonyolultsága, részben a zajmikrofon és a zajérzet keletkezése közötti távolság, részben pedig a digitális jelfeldolgozás késleltetése okozza.

A fél éves munka során számba vettem az egyéni zajcsökkentő berendezésekkel kapcsolatos alapvető akusztikai és jelfeldolgozási szempontokat. A dolgozatban ismertetett zajcsökkentő berendezés esetében a legfőbb korlátozó tényezőnek a rendszer késleltetése és számítási kapacitásának korlátozottsága bizonyult.

A mérési eredmények alapján elmondható, hogy sikerült nyílt kialakítással reprodukálni az alsó kategóriás zajcsökkentős fejhallgatók teljesítményét. Periodikus zavarok elnyomásában a sisak egyértelmű előnnyel rendelkezik, sztochasztikus zavarok esetén pedig majdnem olyan jól teljesített, mint az AMP fejhallgatója és világosan jobbnak bizonyult a Sony termékénél.

A továbbfejlesztési feladatokat a hardveres, illetve az akusztikai–jelfeldolgozási irányok valamelyikébe sorolhatjuk.

Az első kategóriába tartoznak a sisak mobilabbá tételét szolgáló fejlesztések. Ilyen pl. a kisebb fogyasztású elektronikus eszközök kiválasztása és sisakra telepítése. A fogyasztási adatok alapján reális célnak tűnik, hogy kisméretű akkumulátorral (150 g – 12 Wh) 8 órán keresztül üzemképes legyen az eszköz.

Különleges helyzetekben kívánatos lehet a referenciajel távoli vételezése. Érdemes lehet ezért a sisakot analóg rádióvevővel kiegészíteni, amely képes minimális késleltetés mellett tetszőleges referenciajelet fogadni.

A sisak komfortosabbá tételéhez, a zajcsökkentő alkatrészek biztonságos elhelyezéséhez egy célspecifikus ipari formaterv is szükséges, amely külső szakmai segítséget igényel.

A második kategória feladatai az elnyomás mértékének növelését célozzák meg. A zajcsökkentési programot optimalizálni lehetne a keresztutak teljes elhagyásával, a futtatáshoz pedig egy modern, energiatakarékosabb és nagyobb teljesítményű jelprocesszort lehetne választani. Az így rendelkezésre álló számítási többletteljesítmény lehetővé tenné a zajcsökkentési algoritmus továbbfejlesztését.

Nagyobb fókuszú szűrők segítségével részletesebb átviteli modelleket lehetne megvalósítani, kiegészítő szűrési feladatokkal (pl. referencijel visszhangmentesítése) pedig az elnyomás hatásfokát lehetne javítani. Lehetővé válna több referencijel feldolgoása is.

Amennyiben a sisak körül kellő mennyiségű referenciamikrofont tudnánk elhelyezni, jelentősen csökkenteni lehetne az elnyomás fejhallgatókra is jellemző irányfüggését.

Az eddigi mérések és tapasztalatok tükrében nincsen komoly elvi akadály az eszköz hatékonyabbá tételének. A zajcsökkentő sisak jelenlegi változata még nem érett a tetszőleges körülmények közötti éles bevetésre, de sikerült megtenni az első lépéseket egy olyan termék kifejlesztésében, amely a nyílt kialakításban rejlő előnyök révén zajcsökkentő eszközök új generációjának egyik első tagja lehetne.

## Irodalomjegyzék

- [1] Bjarnason, Elias: "Analysis of the Filtered-X LMS Algorithm", IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, Vol. 3. No. 6., November 1995.
- [2] Elliot S.J.; Nelson P.A.: "Active Noise Control", IEEE Signal Processing Magazine, October 1993.
- [3] Kuo, Sen M.; Morgan, Dennis R.: "Active Noise Control: A Tutorial Review", Proceedings of The IEEE, Vol. 87. No. 6., June 1999.
- [4] Sujbert László: "Periodikus zavarhatások csökkentésének aktív módszerei", PhD doktori disszertáció, BME 1997.
- [5] "Sony's Technology Highlights – Digital Noise Cancelling", [http://www.sony.net/SonyInfo/technology/technology/theme/noise\\_01.html](http://www.sony.net/SonyInfo/technology/technology/theme/noise_01.html) 2011. november 27.
- [6] "Variable Gain Active Noise Canceling System With Improved Residual Noise Sensing", United States Patent nr. 6 118 878, 1997.
- [7] "ADSP-2126x Sharc DSP Core Manual", Analog Devices, 2004.
- [8] "AD73322 Manual", Analog Devices, 2000.
- [9] "Estimating Power Dissipation for ADSP-21262S SHARC® DSPs", Analog Devices, December 2, 2003.

# Függelék

## Matlab program a 3. fejezet szimulációinak elvégzéséhez

szim\_\_elnyomas\_01.m

*futtatandó kódfájl*

```
% =====  
%   Szimulációs beállítások  
% =====  
  
freq = 200;  
res = 0.001;  
xsize = .18;  
ysize = .18;  
  
% Zajforrások  
src = [PointSource(.45, 2.1, freq, 3*pi/4, 50),  
       ];  
  
% Mikrofonpozíciók  
mic = [Vector2D(.13, .09),  
       ];  
  
% Beavatkozók (csak pozícióval és frekvenciával megadva)  
act = [PointSource(.09, .09, freq),  
       ];  
  
% Ábrák bekapcsolása  
off_field_items = 0; %1 esetén a mezőn kívüli elemeket is ábrázolja  
create_spd = 0; %felületi teljesítménysűrűség-mező  
create_supression = 0; %elnyomási mező  
  
% =====  
%   Számítások  
% =====  
  
F = Field2D(xsize, ysize, res);  
  
% A kezdeti mező kiszámítása  
for j=1:length(src)  
    for x=0:res:xsize  
        for y=0:res:ysize  
            F.increment(x,y,src(j).getPhasor(x,y));  
        end  
    end  
end  
  
% Átviteli együtthatók számítása  
H = zeros(length(mic), length(act));  
for j=1:length(mic)  
    for k=1:length(act)  
        ds = (mic(j).x - act(k).x)^2 + (mic(j).y - act(k).y)^2;  
        df = sqrt(ds)/(340/freq)*2*pi;  
        H(j,k) = 1/(4*pi*ds)*exp(-1j*df);  
    end  
end
```



```

end

% A beavatkozók vezérlésének kiszámítása
C = zeros(length(mic));
for j=1:length(mic)
    C(j) = F.getValue(mic(j).x, mic(j).y);
end

X = pinv(H)*(-C);
for j=1:length(act)
    act(j).setPhasor(X(j));
end

% A beavatkozók terének szuperponálása
oldfield = Field2D();
oldfield.copy(F);
for j=1:length(act)
    for x=0:res:xsize
        for y=0:res:ysize
            F.increment(x,y,act(j).getPhasor(x,y));
        end
    end
end

% Felületi teljesítménysűrűség ábrázolása
if create_spd == 1
    M = 10*log10(abs(F.getField()));
    if res == 0.01
        dim = 'length (cm)';
    else
        dim = strcat(strcat('length (cm/',num2str(0.01/res)),')');
    end
    create_imagesc(M,[0 50],strcat(strcat('Surface power density
@',num2str(freq)), ' Hz'),dim,dim,mic,src,act,res,off_field_items);
end

% Elnyomási mező ábrázolása
if create_supression == 1
    if res == 0.01
        dim = 'hossz (cm)';
    else
        if res == 0.001
            dim = 'hossz (mm)';
        else
            dim = strcat(strcat('hossz (cm/',num2str(0.01/res)),')');
        end
    end
    dif = abs(F.getField()) ./ abs(oldfield.getField());
    sup = 10*log10(dif);
    create_imagesc(sup,[-20 20],strcat(strcat('Elnyomási tér
@',num2str(freq)), ' Hz'),dim,dim,mic,src,act,res,off_field_items);
end

```

PointSource.m

*pontszerű hangforrást leíró osztály*

```

classdef PointSource < handle
    %PointSource Summary of this class goes here
    % Detailed explanation goes here

    properties
        x
    end
end

```

```

    y
    frequency
    ph
    power
end

methods
function ps = PointSource(x, y, frequency, ph, power)
    if nargin == 5
        ps.x = x;
        ps.y = y;
        ps.frequency = frequency;
        ps.ph = ph;
        ps.power = power;
    elseif nargin == 4
        ps.x = x;
        ps.y = y;
        ps.frequency = frequency;
        ps.ph = phase(ph);
        ps.power = abs(ph);
    elseif nargin == 3
        ps.x = x;
        ps.y = y;
        ps.frequency = frequency;
        ps.ph = 0;
        ps.power = 0;
    else
        ps.x = x;
        ps.y = y;
        ps.frequency = 100;
        ps.ph = 0;
        ps.power = 0;
    end
end

function p = getPhasor(this, x, y)
    if nargin == 3
        if x == this.x && y == this.y
            p = 0;
        else
            ds = (x-this.x)^2 + (y-this.y)^2;
            fi = this.ph - sqrt(ds)/(340/this.frequency)*2*pi;
            p = this.power/(4*pi*ds) * exp(1i*fi);
        end
    else
        p = this.power * exp(1i*this.ph);
    end
end

function setPhasor(this, phasor)
    this.ph = phase(phasor);
    this.power = abs(phasor);
end

function copy(this, other)
    this.x = other.x;
    this.y = other.y;
    this.frequency = other.frequency;
    this.ph = other.ph;
    this.power = other.power;
end
end
end

```

## Field2D.m

### *2 dimenziós mezőt reprezentáló osztály*

```
classdef Field2D < handle
    %FIELD Summary of this class goes here
    % Detailed explanation goes here

    properties
        data
        res
    end

    methods
        function f = Field2D(xsize, ysize, res)
            if nargin == 3
                f.data = zeros(ysize/res+1, xsize/res+1);
                f.res = res;
            else
                f.data = 0;
                f.res = 0;
            end
        end

        function setValue(this, x, y, value)
            if mod(round(x/this.res),1) > 0 || mod(round(y/this.res),1) > 0
                error('The given coordinate is not part of the field at this
resolution');
            else
                this.data(round((y+this.res)/this.res),
round((x+this.res)/this.res)) = value;
            end
        end

        function increment(this, x, y, value)
            if mod(round(x/this.res),1) > 0 || mod(round(y/this.res),1) > 0
                error('The given coordinate is not part of the field at this
resolution');
            else
                this.data(round((y+this.res)/this.res),
round((x+this.res)/this.res)) = this.data(round((y+this.res)/this.res),
round((x+this.res)/this.res)) + value;
            end
        end

        function v = getValue(this, x, y)
            if mod(round(x/this.res),1) > 0 || mod(round(y/this.res),1) > 0
                error('The given coordinate is not part of the field at this
resolution');
            else
                v = this.data(round((y+this.res)/this.res),
round((x+this.res)/this.res));
            end
        end

        function f = getField(this)
            f = this.data;
        end

        function copy(this, other)
            this.data = other.data;
            this.res = other.res;
        end
    end
end
```

## Vector2D.m

### *2 dimenziós vektort reprezentáló osztály*

```
classdef Vector2D < handle
    %VECTOR2D Summary of this class goes here
    % Detailed explanation goes here

    properties
        x
        y
    end

    methods
        function v = Vector2D(x, y)
            v.x = x;
            v.y = y;
        end

        function ph = getFieldValue(this, field)
            ph = field.getValue(this.x, this.y);
        end
    end
end

end
```

## create\_imagesc.m

### *akusztikus mezőt ábrázoló függvény*

```
function create_imagesc(data, range, ti, xl, yl, mic, src, act, res, oore)
%UNTITLED Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
figure();
imagesc(data,range);
set(gca,'YDir','normal');
hold on;
title(ti);
xlabel(xl);
ylabel(yl);
colorbar

for j=1:length(mic)
    xix = (mic(j).x+res)/res;
    yix = (mic(j).y+res)/res;
    if oore == 1
        plot(xix,yix,'ro','MarkerSize',10);
        plot(xix,yix,'rx','MarkerSize',10);
    else
        if xix > 0 && yix > 0 && xix < size(data,2) && yix < size(data,1)
            plot(xix,yix,'ro','MarkerSize',10);
            plot(xix,yix,'rx','MarkerSize',10);
        end
    end
end

for j=1:length(src)
    xix = (src(j).x+res)/res;
    yix = (src(j).y+res)/res;
    if oore == 1
        plot(xix,yix,'rs','MarkerSize',10);
        plot(xix,yix,'rx','MarkerSize',10);
    end
end
```

```

else
    if xix > 0 && yix > 0 && xix < size(data,2) && yix < size(data,1)
        plot(xix,yix,'rs','MarkerSize',10);
        plot(xix,yix,'rx','MarkerSize',10);
    end
end
end

for j=1:length(act)
    xix = (act(j).x+res)/res;
    yix = (act(j).y+res)/res;
    if oore == 1
        plot(xix,yix,'rd','MarkerSize',10);
        plot(xix,yix,'r+','MarkerSize',10);
    else
        if xix > 0 &&yix > 0 && xix < size(data,2) && yix < size(data,1)
            plot(xix,yix,'rd','MarkerSize',10);
            plot(xix,yix,'r+','MarkerSize',10);
        end
    end
end
axis image;
hold off;
end

```