



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VILLAMOSMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR
MÉRÉSTECHNIKA ÉS INFORMÁCIÓS RENDSZEREK TANSZÉK

Akusztikus iránymérő eljárás fejlesztése

DIPLOMATERV

Készítette
Németh Zsolt

Tanszéki konzulens
Molnár Károly

Külső konzulens
Balogh László

2011. május 11.

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott *Németh Zsolt*, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a diplomatervet 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.

Budapest, 2011. május 11.

Németh Zsolt
hallgató

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék	II
Kivonat	V
Abstract	VI
Bevezető	1
1. Akusztikai képkalkotás	3
1.1. Nyalábformálás	3
1.2. Közeltéri akusztikus holográfia	4
1.3. Inverz módszerek	6
2. Nyalábformálás	7
2.1. A végtelen fókusz távolságú nyalábformálás	7
2.1.1. Antennarendszerekben alkalmazott nyalábformálás, haladóhullám táplálás	9
2.1.2. Egyenlő távolságú antenasorok iránytényezője, progresszív fáziseloszlás	10
2.1.3. Az $F(\Psi) \rightarrow F(\vartheta)$ transzformáció	12
2.1.4. A végtelen fókusz távolságú nyalábformálás hátrányai	14
2.2. A véges fókusz távolságú nyalábformálás	14
2.2.1. Az alkalmazott adó-vevő modell vizsgálata Green-függvény segítségével	15
2.2.2. Hangnyomás számítása az adópontokban	17
2.2.3. A mikrofonok elrendezése	18
2.2.4. A véges és a végtelen fókusz távolságú nyalábformálás összehasonlítása	19

3. Különleges elrendezésű mikrofontömbök, térbeli aliasing	20
3.1. Térbeli aliasing	20
3.2. A nyalábformálással elérhető felbontás	21
3.3. A mikrofontömb elrendezése	22
3.3.1. Egyenletes vonalmenti elhelyezkedés	23
3.3.2. A mikrofontömb szabálytalan kialakítása	23
4. Szimuláció elkészítése	27
4.1. Iránymeghatározó algoritmus választása	27
4.2. A szimuláció megvalósítása, működése	28
5. Az irányméréshez használt rendszer elkészítése	39
5.1. A prototípus és a mikrofontömb megépítése	39
5.2. Az áramkör működésének vizsgálata	42
6. Iránymeghatározás az elkészített rendszer alkalmazásával	44
6.1. Mérés, a hangforrás irányának meghatározása kisebb laborban	45
6.2. Mérés nagyobb tanteremben	52
7. Gyakorlati alkalmazások	57
7.1. Hangforrások lokalizálása az autóiparban	57
7.1.1. Jármű a szélcsatornában	57
7.1.2. Utastérbe helyezett akusztikai kamera	58
7.1.3. Motorhang vizsgálata	60
7.2. Zajforrások vizsgálata	60
7.3. Minőség-ellenőrzés, minőségbiztosítás	62
8. Kereskedelemben kapható akusztika kamera rendszerek	64
8.1. Adatgyűjtő egység és adatfeldolgozó szoftver	64
8.2. Mikrofontömbök	65
9. Összefoglalás	69
Köszönetnyilvánítás	71
Irodalomjegyzék	72
Ábrák jegyzéke	74

Függelék	77
F.1. Script.m fájl	77
F.2. Calctable.m fájl	79
F.3. Calcpattern.m fájl	80
F.4. Calcrealpattern.m fájl	82
F.5. Polarfig.m fájl	82
F.6. Erzekenyseg.m fájl	82

Kivonat

Napjainkban sok esetben van szükség egy hangforrás irányának meghatározására. E célra használhatunk több mikrofonból álló akusztikai kamerarendszereket. Ezeknek az eszközöknek a segítségével lehetőség van összetett hangforrásokról akusztikai képet készíteni a mikrofonok közvetlenül a mérni kívánt felületre való ráhelyezése nélkül. A mikrofontömbből nyert jelek felhasználásával többféle eljárás, algoritmus segítségével készíthető akusztikai kép.

Az algoritmusok áttekintése után, diplomatervem megvalósítása során az egyik választott algoritmust megírtam MATLAB programban, majd segítségével meghatároztam szimulált hangforrások helyét. Ezt követően megépítettem egy mikrofontömböt, mellyel iránymeghatározás végezhető, és valós környezetben végeztem méréseket hangforrások irányának meghatározására.

Abstract

These days there is a high demand for sound localization. Acoustic camera systems, which contain lots of microphones, may be used for this purpose. Using these instruments, it is possible to gain an acoustic image without having to put microphones directly on the surface. An acoustic image can be gain using the microphones' signals.

After introducing the sound localization techniques and methods, this thesis report demonstrates a sound localization algorithm in MATLAB environment. I localized incoming direction of simulated sound sources using this algorithm. Finally, I built a microphone array, and I made measurements to localize real sound sources.

Bevezető

Napjainkban sok esetben van szükség akusztikai képalkotásra, iránymeghatározásra, egy adott térrész vagy test által kibocsátott hangsugárzás mérésére. Előfordul azonban, hogy az adott felületre nem helyezhetők közvetlenül mikrofonok a hangsugárzás mérésére, mivel az túlságosan nagy kiterjedésű, túl magas hőmérsékletű, esetleg rezgő, vagy nagy sebességgel mozgó felület.

Ezekben az esetekben akusztikai kamerát alkalmazhatunk. Ez egy több mikrofonból álló rendszer, mely az adott felület minden pontját végigpásztázza, a pontokról akusztikai képet alkotva. A vizsgálandó felület és az akusztikai kamera távolsága nem korlátozott, a kapott felbontás és minőség a mikrofonok számától, elhelyezésének módjától, minőségétől, valamint a regisztrált értékek felhasználási módjától, tehát az akusztikai képalkotó algoritmustól függ. Az eljárás során a kamera iránykarakterisztikáját változtatva pásztázzuk végig a vizsgált térrészt, és megkülönböztetjük a sugárzó pontokat.

A mikrofontömbből nyert jelek felhasználásával többféle módon vizsgálhatjuk a tárgyakat. A módszerek 3 főbb kategóriába sorolhatók: közeltéri akusztikus holográfia (NAH – Nearfield Acoustic Holography), akusztikai nyalábformálás, valamint inverz módszerek.

Munkám során az akusztikai iránymeghatározó módszerek tanulmányozása és ismeretése után kiválasztottam a feladatom megoldásához legjobban illeszkedő algoritmust, melyet MATLAB környezetben implementálva szimuláltam és értékeltem annak működését. Ezt követően egy valós mikrofontömböt megépítve, a megvalósított algoritmus alkalmazásával méréseket végeztem hangforrások irányának meghatározására.

Az 1. fejezetben bemutatom az akusztikai nyalábformálás módszereit.

A 2. fejezet részletesen ismerteti a véges, és végtelen fókusz-távolságú nyalábformálást.

A 3. fejezetben a különleges elrendezésű mikrofontömbökkel végzett lokalizáció előnyeiről, valamint a térbeli aliasing jelenségről számolok be.

A 4. fejezetben bemutatom az általam választott iránymeghatározó algoritmus MATLAB-os megvalósítását, valamint az azzal végzett szimulációk részletes elemzését.

Az 5. fejezet ismerteti az irányméréshez elkészített rendszert.

A 6. fejezet a valós környezetben történő lokalizáció megvalósításáról, az eredmények értékeléséről szól.

A 7. fejezetben vázoló az akusztikai kamerarendszerek gyakorlati alkalmazásait.

A 8. fejezet a kereskedelemben kapható akusztikai kamerarendszerekkel foglalkozik.

1. fejezet

Akusztikai képalkotás

Egy hangforrás helyének pontos lokalizálására az 1990-es évek eleje óta több módszert is ismertettek, melyek mindegyike mikrofontömbök kialakításán alapul. Ezeket a rendszereket napjainkban számos iparágban használják: például az autók utasterében akusztikai kamerával készült felvételek lehetővé teszik a zajforrások helyének pontos meghatározását. Repülőgépekről, vagy nagy sebességgel mozgó járművekről, vonatokról, magas hőmérsékletű ipari berendezésekről készült akusztikai képen szintén jól láthatóak a zajforrások. Ezekben az alkalmazásokban a járművek mozgásának követése fontos feladat, csakúgy mint olyan helyzetekben, amikor a forrás mozdulatlan marad a mikrofontömbhöz képest [5].

Az ilyen módon történő akusztikai hely-, vagy iránymeghatározás nagy előnye, hogy a háttérzajok elnyomhatók, ez pedig lehetővé teszi a felületek zajos környezetben – mint szélcsatornáknál – való vizsgálatát.

A mikrofontömbből nyert jelek felhasználásával sokféle módon vizsgálhatjuk a tárgyat. Általánosságban, a módszerek 3 kategóriába sorolhatók [7]: köztéri akusztikus holográfia (NAH – Nearfield Acoustic Holography), akusztikai nyalábformálás, valamint inverz módszerek. Ezek közül az akusztikai nyalábformálás (beamforming) a legelterjedtebb.

1.1. Nyalábformálás

A nyalábformálásra, mint módszerre általánosabb kifejezés a fázisvezérelt antennarács (phased array of microphones), vagy mikrofon antenna, amelyek azt fejezik ki, hogy a rendszer nem csak mikrofontömbökből áll, hanem jelfeldolgozást is végez.

A fázisvezérelt antennarácsokat a második világháború során fejlesztették ki rada-

rantennákhoz. Manapság ezeket széles körben használják az orvosi képalkotásban is, az ultrahangvizsgálatok során. A fázisvezérelt antennarács a korszerű rádiólokátorok sugárnyalábjának eltérítésre használt eszköz [9]. Nyílásfelületén sok apró, egyszerű antenna van fixen elhelyezve. A kisugárzott nyaláb eltérítését az egyes antennák által kisugárzott jelek fázisának változtatásával oldják meg, azaz az egymás melletti antennák mindig kicsit más fázisban sugároznak. A kisugárzott rádiójelek a sugárzási mintázatnak megfelelően egyes irányokban összeadódnak, más irányokban kioltódnak, így a lokátor végül csak bizonyos, meghatározott irányokban sugároz.

A nyalábformálásnak széleskörű alkalmazása ismert: használják radarantennákban, ultrahangban, szonár alkalmazásokban tengeralattjárók esetén, több antennából álló rendszer esetén egyes kitüntetett irányokban a térerősség növelésére, valamint akusztikai nyalábformálás esetén akusztikai kamerarendszerek kialakításához zajforrások, vagy egyéb hangforrások helyének meghatározása céljából. Az egyes módszerek közti legfőbb különbségek a fizikai megvalósításban vannak, valamint a mintavételi, és a középfrekvenciában.

A diplomaterv az akusztikai képalkotó eljárásokkal foglalkozik. Mivel ezek közül is a legelterjedtebbek a nyalábformáláson alapuló eljárások, ezért ezekkel külön fejezet foglalkozik.

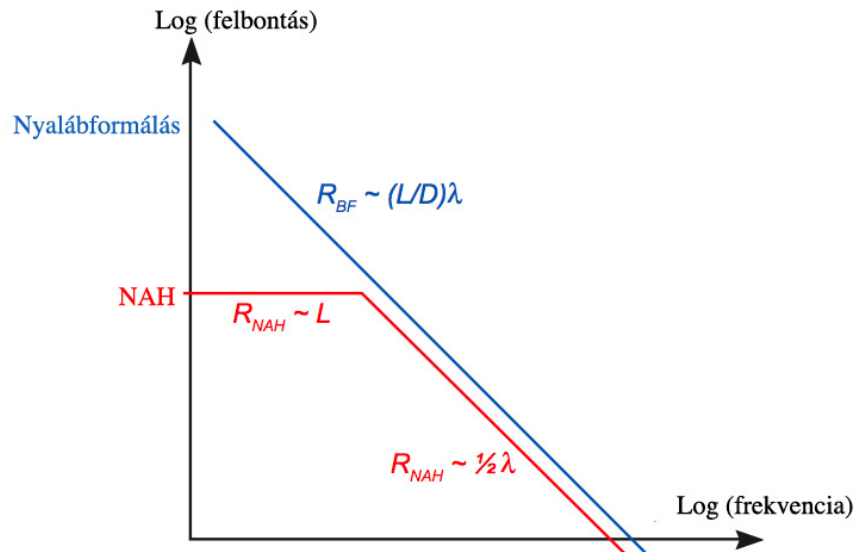
1.2. Közeltéri akusztikus holográfia

A közeltéri akusztikus holográfia (NAH – Nearfield Acoustic Holography) jól bevált módszer hatékony és pontos zajforrás meghatározásra [3]. Az 1980-as években mutatták be, napjainkban jól ismert technikának számít.

A NAH nagy felbontású képet ad egy síkfelületen elhelyezkedő hangforrásokról. Az ehhez használt mikrofontömb legtöbbször egy szabályos négyszögletes rács rácspontjaiban elhelyezkedő mikrofonokból áll, melyet a hangforrás közelterében kell elhelyezni. Közeltérnek számít az a távolság, amely a hangforrástól közelebb van, mint a legmagasabb frekvenciához tartozó hullámhossz 1-2-szerese [7]. A mikrofonrács mérete teljes mértékben, plusz a vizsgált felület szélétől vett 45° -os szöget bezáró tartományban le kell hogy fedje a vizsgálni kívánt zajforrást. Mivel a rácspontok közti távolságnak kisebbnek kell lennie a legmagasabb vizsgálni kívánt hangfrekvencia hullámhosszának felénél, ezért, amennyiben a forrás mérete sokkal nagyobb mint a vizsgálni kívánt maximális frekvenciához tartozó hullámhossz, számos mikrofonra szükség lehet [3]. A probléma akkor is fennáll, ha valamilyen oknál fogva nem tudunk a forráshoz közel mérni. Ilyenkor a

kívánt 45° -os lefedési szög miatt a mérési terület nagy lehet, amely szintén sok mikrofon alkalmazását igényli. Ezekben az esetekben a nyalábformálás vonzó alternatíva lehet akusztikai képalkotásra. A NAH lehetővé teszi kalibrált hangintenzitás-térkép alkotását is.

Az 1.1 ábra a nyalábformálással és a közelítéri akusztikus holográfiával elérhető felbontást szemlélteti a hangfrekvencia függvényében.



1.1. ábra. A NAH és a nyalábformálás felbontásának összehasonlítása [4]

A NAH két fontosabb előnye, hogy a térbeli felbontás független a frekvenciától, valamint alkalmazásával lehetőség van hangnyomásszintek, illetve intenzitásszintek meghatározására. Hátránya, hogy a forrásfelületnek párhuzamosan kell elhelyezkednie a mérési felület közelterében, valamint hogy nagy frekvenciákon nem praktikus, mivel nagyon sok mikrofont igényel.

A nyalábformálás kis, közepes, vagy nagy távolságokból teszi lehetővé hangforrás meghatározását. A NAH-hal ellentétben, a nyalábformáláshoz nem szükséges, hogy a mikrofontömb mérete nagyobb legyen, mint a vizsgálni kívánt felület. Használatakor nem szükséges szabályos elrendezésű mikrofonrácst sem kialakítani, az elrendezés tetszőleges, akár véletlenszerű is lehet. A közelítéri környezetet kívül a rácshálózat hatékonyan elnyomja a térbeli átlapolódási jelenségeket, így jó felbontás és pontosság érhető el, ha a rácspontok távolsága kisebb, mint a hullámhossz fele. Amennyiben ez a távolság meghaladja a hullámhossz felét, a térben átlapolódó komponensek hamar nagyon zavaró mértékűt öltenek, és fellép a térbeli átlapolódás jelensége. A térbeli átlapolódás azt jelenti,

hogyan a karakterisztikában megjelennek olyan melléknyalábok, amelyek közel ugyanakkorak, vagy ugyanakkorak, mint a főnyaláb. Ezzel szemben, ha a mikrofonok elrendezése szabálytalan, akkor a térbeli átlapolódás elfogadhatóbb szinten tartható magasabb frekvencián is. Ez a magyarázata annak, hogy nyalábformással nagyobb frekvencián, kevesebb mikrofonnal is jó eredmények érhetőek el.

1.3. Inverz módszerek

Az inverz módszerek [7] a NAH-hoz, valamint a nyalábformáláshoz képest újabb hangforrás-lokalizálási eljárások. Az alábbi egyenletrendszert oldják meg:

$$p = Hq, \tag{1.1}$$

ahol p a mikrofontömb által mért hangnyomást reprezentálja, q pedig a hangforrás hang-sugárzásának eloszlását jelenti. p és q a H átviteli függvényen keresztül kapcsolódnak egymáshoz. Az inverz módszerek ezt az egyenletrendszert oldják meg, kiszámítva a H átviteli mátrix inverzét, megszorozva azt p -vel, így megkapják q -t. Az inverz határelem modell (Inverse Boundary-Element Model – IBEM) az egyik ilyen módszer. A hullám-terjedés mátrixát invertálva számítja ki a megoldást.

Az inverz módszerek, köztük az IBEM modell hátránya a nagy számítási kapacitás. Előnyük viszont, hogy segítségükkel a forrás jelerőssége pontosabban meghatározható.

2. fejezet

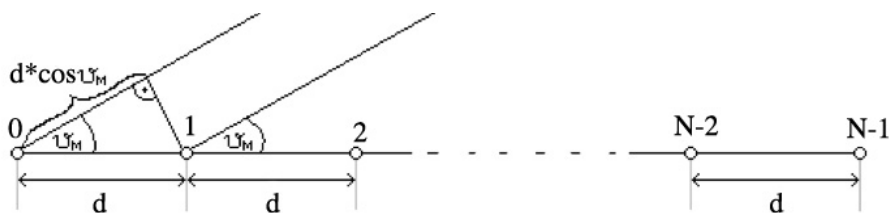
Nyalábformálás

A nyalábformálásnak (beamforming) két fajtája van: a véges és a végtelen fókusz távolságú nyalábformálás.

A végtelen fókusz távolságú beamforming akkor alkalmazható, ha a mikrofontömb a hangforrás távolterében helyezkedik el. Ekkor a hanghullámok már síkhullámoknak tekinthetők, míg közeltérben (véges fókusz távolságú nyalábformálás esetén) gömbhullámoknak. A nyalábformálást esetenként „delay and sum” (késleltetés és összeadás) rendszernek hívják, mivel működése a különböző mikrofonok által vett jelek késleltetésén, és összeadásán alapul.

2.1. A végtelen fókusz távolságú nyalábformálás

A módszer megértéséhez induljunk ki az alábbi következtetésekből: helyezzünk el a hangforrás távolterében egy mikrofontömböt, amelyben minden mikrofon egymástól egyenlő távolságra, egy egyenes mentén található. Az elrendezést a 2.1 ábra mutatja.



2.1. ábra. A mikrofontömb elrendezése

A mikrofonokat 0-tól $N-1$ -ig számoztuk, a köztük lévő távolság d . Mivel távoltről van szó, a hanghullámok síkhullámoknak tekinthetők, így feltételezhetjük, hogy egy

adott pontforrásból az egyes mikrofonokba érkező jelek ugyanolyan ϑ_M szöget bezáróan érkeztek.

Ekkor, amennyiben a hang terjedési sebessége c , a hanghullám az egymással szomszédos mikrofonokat

$$\tau = \frac{d \cdot \cos(\vartheta_M)}{c} \quad (2.1)$$

időkülönbséggel éri el, ahol τ az időkülönbség, d a mikrofonok egymástól vett távolsága, c a hang terjedési sebessége, ϑ_M pedig a mikrofonosor és a beérkező hanghullám által bezárt szög. Ekkor két egymás mellett lévő mikrofon által vett jel fáziskülönbsége:

$$\delta = \frac{2\pi f d \cdot \cos(\vartheta_M)}{c}, \quad (2.2)$$

ahol δ a fáziskülönbség. Legyen

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c}, \quad (2.3)$$

β a hullámszám. Ekkor

$$\delta = \beta d \cdot \cos(\vartheta_M). \quad (2.4)$$

Ha a mikrofonok egymástól egyenlő távolságra helyezkednek el, az n -edik mikrofon által vett jel időkülönbsége az első mikrofonhoz képest:

$$\tau_n = n \cdot \tau \quad (2.5)$$

lesz, tehát

$$\tau_0 = 0, \tau_1 = \tau, \tau_2 = 2 \cdot \tau \dots$$

Ekkor

$$\delta_n = n\beta d \cdot \cos(\vartheta_M), \quad (2.6)$$

ahol δ_n az n -edik mikrofon által vett jel fáziskülönbsége, az első mikrofonhoz viszonyítva.

Ha minden mikrofon jelére alkalmazzuk ezt a fáziskésleltetést, a mikrofonok vett jelei azonos fázisba kerülnek. Ekkor a vett és a fáziskésleltetett jelek összeadásakor konstruktív interferencia lép fel, a jelek erősítik egymást. Ennek hatására a mikrofonosor a ϑ_M szög által meghatározott irányba lesz a legérzékenyebb. A fáziskésleltetések változtatásával a mikrofonosor iránykarakterisztikája változtatható.

Egy adott fáziskésleltetés beállításával a főirányt pontosan beállíthatjuk, de ezzel a módszerrel más, a főirányon kívüli irányból érkező jeleket is ugyanígy késleltetjük és összegezzük. Ezek hol erősítik, hol csillapítják egymást, így az iránykarakterisztika pontos meghatározásához további vizsgálat szükséges.

2.1.1. Antennarendszerekben alkalmazott nyalábformálás, haladóhullám táplálás

Az akusztikai nyalábformálás működésének elvei megegyeznek a antennarendszerekben alkalmazott nyalábformálással, így annak részletes elemzését ezen keresztül mutatjuk be [1]. Az egyik különbség az, hogy míg az előbbi hangfrekvenciás tartományban működik, az utóbbit elektromágneses hullámokra alkalmazzák, továbbá az antennák sugárzó elemek.

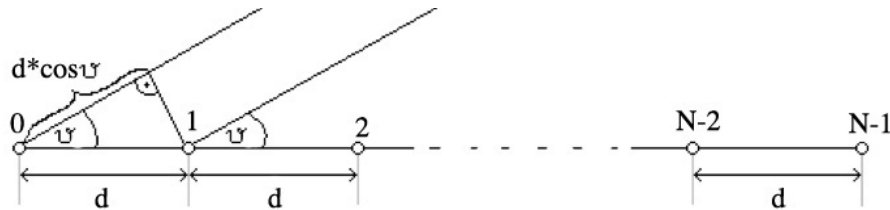
Több antennából álló rendszerek esetén szükség lehet arra, hogy egy kitüntetett főirányban az egyes antennák által sugárzott jelek fázishelyesen összegződjenek, így az adott irányban maximális térerősséget lehessen elérni. Ez úgy érhető el, hogy az antennák tápáramait fázisban eltolják. A módszert haladóhullám táplálásnak nevezik.

Napjainkban általában ezt alkalmazzák fázisvezérelt antennarácsok esetén. A fázisvezérelt antennarácsoknak számos előnye van a hagyományos kialakítású, mechanikus sugáreltérítésű antennákhoz képest: mozgó alkatrész nincs bennük, így kevésbé hajlamosak a meghibásodásra. Nincs szükség az antennát mechanikusan mozgó mechanizmusra sem, így a kisugárzott jel iránya sokkal gyorsabban, akár néhány nanosecundum alatt változtatható.

Az antennarendszer iránykarakterisztikájának vizsgálatához egy egyszerű elrendezésből indulunk ki.

2.1.2. Egyenlő távolságú antennasorok iránytényezője, progresszív fáziseloszlás

A legegyszerűbb antennarendszer az egyenlő távolságú antennasor, melynek minden eleme egy egyenes mentén helyezkedik el [1,6]. Legyen az elemek közti távolság d , és az első elem a zérus indexű elem. Az elrendezést a 2.2 ábra mutatja.



2.2. ábra. Egyszerű antennasor elrendezése

Ekkor, amennyiben mindegyik antenna tápáramának fázisa megegyezik, az antennák távolterében, ϑ irányban két egymás melletti antenna által sugárzott jelek fáziskülönbsége:

$$\frac{2\pi f d \cdot \cos(\vartheta)}{c} = \beta d \cdot \cos(\vartheta), \quad (2.7)$$

ahol d az antennák közti távolság, ϑ a kérdéses irányt meghatározó szög, c az elektromágneses hullám terjedési sebessége, β a hullámszám. Az egymást követő antennák által sugárzott jelek fáziseltérése állandó egy adott ϑ szöget bezáró irányban. Amennyiben azt szeretnénk elérni, hogy egy adott ϑ irányban, a térerősségek közt konstruktív interferencia lépjen fel, azaz az adott irányban maximális térerősséget érhessünk el, az antennák tápáramainak fázistolása szükséges. Ekkor a sor mentén a maximális sugárzás irányában haladva monoton növekvő (progresszív) fáziseloszlást kapunk, melynek a gyakorlati alkalmazásban számos előnye van.

Jelölje I_k a k -adik antenna tápáramát, $\text{arc}(I_k)$ pedig a k -adik antenna tápáramának fázisát. Két egymás melletti antenna tápárama közti progresszív fáziseltérés legyen tehát a következő:

$$\text{arc}(I_k) - \text{arc}(I_{k-1}) = \delta. \quad (2.8)$$

Legyen $\text{arc}(I_0) = 0$, ekkor

$$\text{arc}(I_k) = k \cdot \delta, \quad (2.9)$$

minden $k = 0, 1, 2 \dots N-1$ -re.

Ekkor az első antenna tápáramának fázisa:

$$\text{arc}(I_0) = 0 \quad (2.10)$$

lesz. Amennyiben ez a haladóhullámú progresszív fáziskülönbség:

$$\delta = -\beta d \cdot \cos(\vartheta_M), \quad (2.11)$$

ahol ϑ_M a főirány szöge, akkor a térerősség ϑ_M szög által meghatározott irányban lesz maximális, a kitüntetett irányban az antennák közötti távolságkülönbségből adódó fáziskülönbséget a tápláló áram fázisával kompenzáljuk [1]. Antennasorok esetén két főirány kiemelt jelentőségű. Ha $\vartheta_M = 0^\circ$ vagy 180° , akkor a sor orrsugárzó. Haladóhullámú táplálás esetén ez akkor teljesül, ha

$$\delta = -\beta d, \quad \text{ha } \vartheta_M = 0^\circ, \quad (2.12)$$

és

$$\delta = \beta d, \quad \text{ha } \vartheta_M = 180^\circ. \quad (2.13)$$

A másik antenasort oldalsugárzó sornak nevezzük. Ennek főiránya $\vartheta_M = 90^\circ$, melynek feltétele $\delta = 0$.

Az iránykarakterisztika meghatározásához bevezetünk egy új változót:

$$\Psi = \delta + \beta d \cdot \cos(\vartheta), \quad (2.14)$$

Ψ fizikailag az antenasor két szomszédos eleme által előállított távoltéri térerősség közötti fáziskülönbséget jelenti, ϑ szög által meghatározott irányban. Ψ -nek a geometriából (βd) és a táplálásból (δ) adódó összetevői vannak.

Ennek segítségével felírható az antenasor iránytényezője:

$$F(\Psi) = \sum_{k=0}^{N-1} I_k \cdot e^{jk\Psi}. \quad (2.15)$$

Amennyiben $\vartheta = \vartheta_M$, tehát a főirányba nézünk, $\Psi = 0$, így

$$F(\Psi) = \sum_{k=0}^{N-1} I_k, \quad (2.16)$$

azaz a főirányban az iránytényező egyenlő a tápáramok összegével. Megjegyzendő, hogy $F(\Psi)$ 2π szerint periodikus.

2.1.3. Az $F(\Psi) \rightarrow F(\vartheta)$ transzformáció

Amennyiben rendelkezésünkre áll $F(\Psi)$, δ és d változtatásával sokféle $F(\vartheta)$ iránykarakterisztika állítható elő [1]. Ez akusztikai képalkotásnál azt jelenti, hogy a mikrofonok elemtávolságának változtatásával különböző iránykarakterisztika valósítható meg. Ekkor azt nézzük, hogy az adott főirányból érkező hang a hangtér egyes részeiben milyen nagysággal érzékelhető.

$F(\Psi)$ és $F(\vartheta)$ közti összefüggés vizsgálata során először nézzük meg, hogy a fizikailag értelmezhető $\vartheta = 0^\circ - 180^\circ$ tartománynak (az iránytényező a $\vartheta = 0^\circ$ tengelyre szimmetrikus) Ψ mely tartománya felel meg.

A 2.14 képlet alapján:

$$\Psi(0^\circ) = \delta + \beta d,$$

$$\Psi(90^\circ) = \delta,$$

$$\Psi(180^\circ) = \delta - \beta d.$$

A $\vartheta = 0^\circ - 180^\circ$ közötti értékeknek megfelelő Ψ tartomány szélessége $\delta + \beta d - (\delta - \beta d) = 2\beta d$. Ezt a tartományt Ψ látható tartományának nevezik, melynek közepe δ . Az $F(\vartheta)$ iránykarakterisztika tehát $F(\Psi)$ függvény Ψ látható tartományába eső szakasza, ahol $\vartheta = 0^\circ$ -hoz $\Psi = \delta + \beta d$ tartozik, és $\vartheta = 180^\circ$ -hoz $\Psi = \delta - \beta d$.

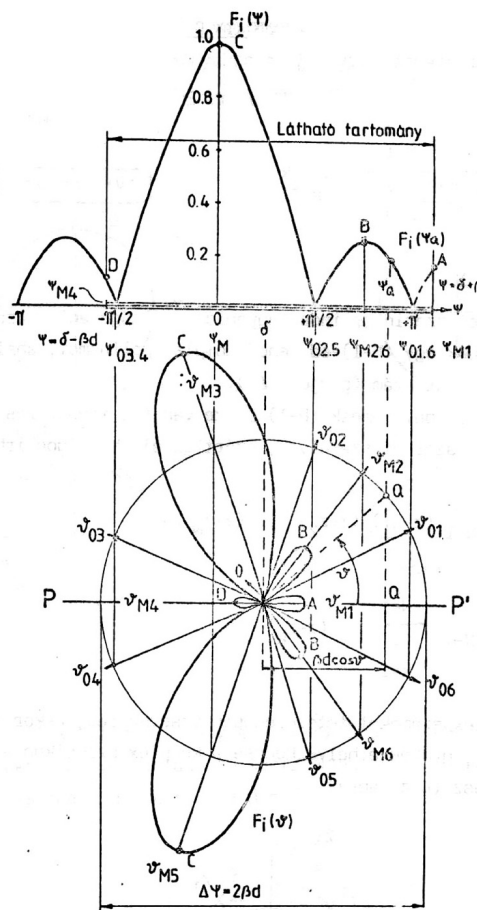
A továbbiakban vizsgáljuk meg, hogy a d elemtávolság változtatásával hogyan változik $F(\Psi)$ és $F(\vartheta)$ kapcsolata. A d távolság határozza meg a látható tartomány szélességét.

Amennyiben $d < \frac{\lambda}{2}$, akkor $2\beta d < \frac{2 \cdot 2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{2}$, tehát $2\beta d < 2\pi$, azaz $F(\Psi)$ -nek van nem látható tartománya is.

Ha $d = \frac{\lambda}{2}$, akkor a látható tartomány hossza 2π .

Ha $d > \frac{\lambda}{2}$, akkor $2\beta d > 2\pi$, ekkor $F(\vartheta)$ -ban $F(\Psi)$ egyes szakaszai ismétlődnek [1]. Ez akusztikai képalkotásnál azt jelenti, hogy amennyiben a mikrofonok elemtávolsága nagyobb, mint a hanghullám hullámhosszának fele, akkor a bejövő hanghullám iránya nem határozható meg pontosan, mivel a túl nagy elemtávolság esetén két vagy több főirány is megjelenhet az iránykarakterisztikában. Ezt hívják térbeli mintavételi tételnek.

Az $F(\Psi)$ és $F(\vartheta)$ közti összefüggés grafikusán szemléltethető. Ehhez tételezzük fel, hogy a 2.15 képletből már kiszámítottuk $F(\Psi)$ -t, és az grafikusán adott. Ebből megszerkeszthető $F(\vartheta)$, ezt a 2.3 ábra szemlélteti.



2.3. ábra. $|F(\Psi)|$ függvény (felső ábra), és az ebből számított $F(\vartheta)$ függvény (alsó ábra, polárdiagramon ábrázolva) [1]

A 2.3 ábrán a főirányt ϑ_{M3} jelöli. Az ábrán látható esetben az elemtávolság: $d < \frac{\lambda}{2}$, így a látható tartomány hossza kisebb, mint 2π . Amennyiben a látható tartomány hosszabb lenne 2π -nél, $|F(\Psi)|$ ismétlődését figyelhetnénk meg $F(\vartheta)$ -ban. Az is megfigyelhető, hogy az iránytényező a $\vartheta = 0^\circ$ tengelyre szimmetrikus. $F(\vartheta)$ -ból fizikailag csak a $0^\circ - 180^\circ$ közti tartományt értelmezzük.

Az eddigiek az akusztikai nyalábformálásban hasonló módon értelmezhetők. A legfőbb különbség, hogy míg az antennák sugárzó eszközök, melyek az elektromágneses tartományban bocsátanak ki hullámokat, addig az akusztikai kamerák mikrofonosorok, amelyek hangfrekvenciás tartományban, vételi üzemmódban működnek. Míg az antennák iránykarakterisztikájának változtatását legtöbbször a tápáramok fázistolásával végzik, addig mikrofonosorok esetén ez a vett jeleken végzett fázistolásokkal valósítható meg.

2.1.4. A végtelen fókusz távolságú nyalábformálás hátrányai

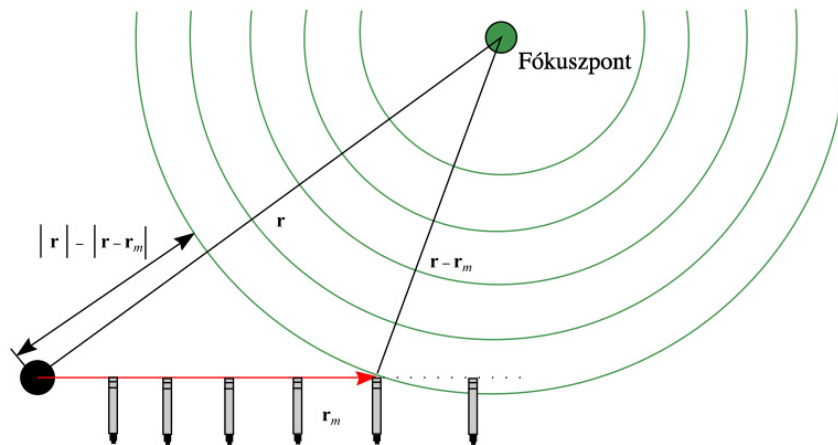
A végtelen fókusz távolságú nyalábformálás esetén több probléma léphet fel. Amennyiben magas frekvenciákon szeretnénk mérni, nagyon közel kell elhelyezni egymáshoz a mikrofonokat, ez pedig nehézségekbe ütközhet. A mikrofonok egymástól vett optimális távolsága a mérni kívánt frekvenciához tartozó hullámhossz fele – mivel ekkor a legjobb az érzékenység, tehát legkisebb az érzékenységi szög. Az érzékenységi szög a főnyaláb maximumára normált iránykarakterisztikában a főnyaláb két -6dB -es pontján át húzott egyenesek által meghatározott szög. A legkisebb érzékenységi szög eléréséhez minden egyes mért frekvencián át kellene rendezni a mikrofontömböt. Ez azt jelenti, hogy széles frekvenciatartományban való mérés esetén sokféle összeállítással szükséges mérni az optimális iránykarakterisztikák eléréséhez, így ez a megoldás sok időt vehet igénybe.

Alacsony frekvenciákon jelentős mértékben megnőhet a mikrofontömb mérete, amely kisebb helyeken – például autók utasterében – elhelyezési nehézségeket okozhat. Ezen kívül fontos a mikrofontömbnek a hangforrástól megfelelő távolságra való elhelyezése, hiszen csak ekkor tekinthetők a hanghullámok síkhullámoknak.

2.2. A véges fókusz távolságú nyalábformálás

Az előző alfejezetben ismertetett módszer azon az elgondoláson alapul, hogy a forrás távolterében a hanghullámok síkhullámoknak tekinthetők. A végtelen fókusz távolság elnevezés is innen ered.

Amennyiben nem tételezzük fel a nagy távolságot, hanem véges (közeli) távolságban egy adott pontra fókuszálunk, és feltesszük, hogy a hanghullámok onnan erednek, akkor azok gömbhullámoknak tekinthetők [2,3]. Ezt a 2.4 ábra szemlélteti.



2.4. ábra. Közeltérbe való fókuszálás esetén a gömbhullámok kiindulópontjának tekinthető fókuszpont és a mikrofonok elhelyezkedése [3]

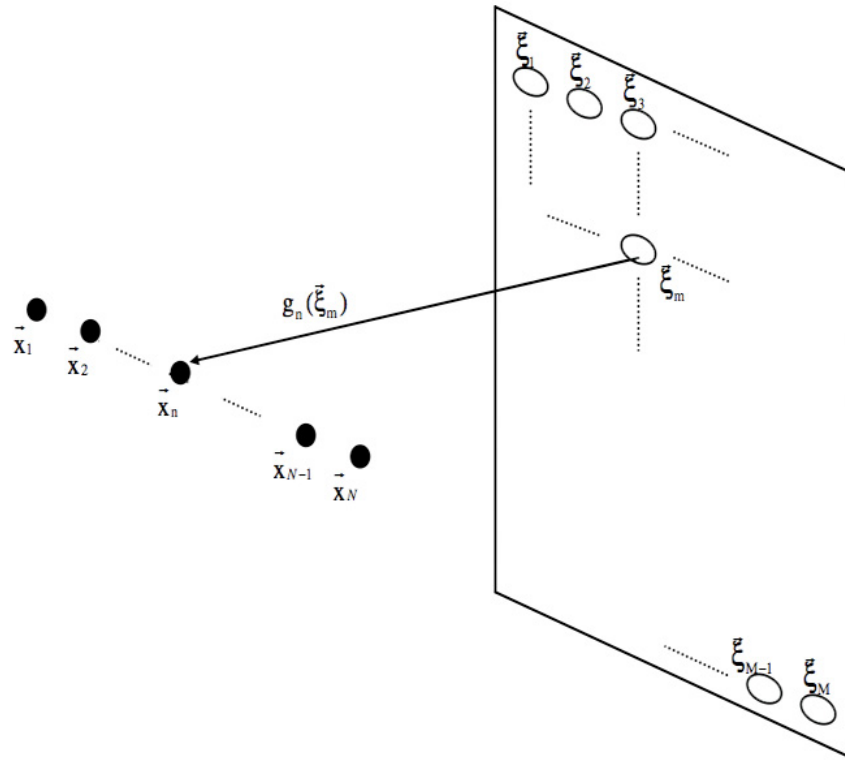
A módszer neve véges fókusz távolságú nyalábformálás. Itt a pontforrások az adópontoknak tekinthetők, melyek a vizsgált felület pontjain helyezkednek el, másik elnevezésük a beamform grid (beamform rács). A mikrofonok a vevőpontok. Később látni fogjuk, hogy a kapott akusztikai képen az egyik legjobb oldalhullám elnyomás úgy érhető el, ha véletlenszerű (optimalizált véletlenszerű) elrendezésű mikrofontömböket használunk.

A véges fókusz távolságú nyalábformáláshoz szükséges az adó-, és vevőpontok helyének (helyvektorainak) pontos ismerete. Ezek alapján az információk alapján, valamint a vett jelek alapján jó közelítéssel kiszámítható az adópontokban mérhető hangnyomás, melyből megrajzolhatjuk a vizsgált felület akusztikai képét.

2.2.1. Az alkalmazott adó-vevő modell vizsgálata Green-függvény segítségével

Tételezzünk fel N mikrofonból, és M rácspontból álló beamform rácsot. Jelölje az n -edik mikrofon helyvektorát \vec{x}_n , az m -edik rácspont helyvektorát $\vec{\xi}_m$. Ha a vizsgálandó felület sík felület, az elrendezést a 2.5 ábra szemlélteti.

Ekkor minden egyes adó-vevő pontpárhoz Green-függvény rendelhető [2]. A Green-függvény a megadott kezdeti-, és peremfeltételek figyelembe vételével inhomogén differenciálegyenletek megoldására szolgál, nyalábformálásnál is jól alkalmazható.



2.5. ábra. Az adó-, és vevőpontok, valamint helyvektoraik szemléltetése [6]

Az n -edik mikrofon-, és m -edik rácspontpárra vonatkozó Green függvény legyen:

$$g_n(\vec{\xi}_m) = \frac{1}{|\vec{\xi}_m - \vec{x}_n|} \cdot e^{jk(|\vec{\xi}_m - \vec{x}_n|)} \quad (2.17)$$

Amennyiben q_m az m -edik pontforrás időfüggvénye, \mathbf{p} oszlopvektor pedig az egyes mikrofonokat érő hangnyomások időfüggvényeit tartalmazza, és \mathbf{p} N hosszúságú oszlopvektor, akkor \mathbf{p} kifejezése:

$$\mathbf{p} = \sum_{m=1}^M q_m \cdot \mathbf{g}(\vec{\xi}_m) + \mathbf{R}, \quad (2.18)$$

ahol q_m az m -edik pontforrás időfüggvénye, \mathbf{g} vektor pedig az m -edik rácspont, és az egyes mikrofonok által meghatározott Green-függvényeket tartalmazza. Az egyes mikrofonok saját zajának vektora \mathbf{R} , melyről feltételezzük, hogy értékei nagyon alacsonyak.

2.2.2. Hangnyomás számítása az adópontokban

Az \mathbf{R} zajt elhanyagolva, a mikrofonok vett jelei alapján az egyes adópontokban, tehát rácspontokban a hangnyomás közelíthető [2]. Ennek számításához szükség van a Green-függvény komplex konjugáltjára:

$$g'_n(\vec{\xi}_m) = \frac{1}{|\vec{\xi}_m - \vec{x}_n|} \cdot e^{-jk(|\vec{\xi}_m - \vec{x}_n|)} \quad (2.19)$$

Ekkor az u_m időfüggvény arányos az m -edik rácspontban található pontforrás időfüggvényével:

$$u_m = \alpha \cdot \mathbf{g}'(\vec{\xi}_m) \mathbf{p}, \quad (2.20)$$

ahol u_m az m -edik adópontban kapott hangsugárzás időfüggvényének közelítése, α egy amplitúdó-korrektív tag, $\mathbf{g}'(\vec{\xi}_m)$ vektor az m -edik rácspont, és az egyes mikrofonok által meghatározott Green-függvényeket tartalmazó vektor komplex konjugáltja, \mathbf{p} oszlopvektor pedig a mikrofonokat érő eredő hangnyomások időfüggvényeit tartalmazza.

Ekkor

$$u_m = \alpha \sum_{n=1}^N g'_n(\vec{\xi}_m) \cdot p_n, \quad (2.21)$$

ahol $g'_n(\vec{\xi}_m)$ a n -edik mikrofon, és m -edik adópontra vonatkozó Green-függvény komplex konjugáltja, p_n pedig az n -edik mikrofont érő hangnyomás időfüggvénye.

Az α amplitúdó-korrektív tag számítása [2]:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{(\mathbf{g}' \mathbf{g})^2}} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i,n} |g_i|^2 |g_n|^2}} \quad (2.22)$$

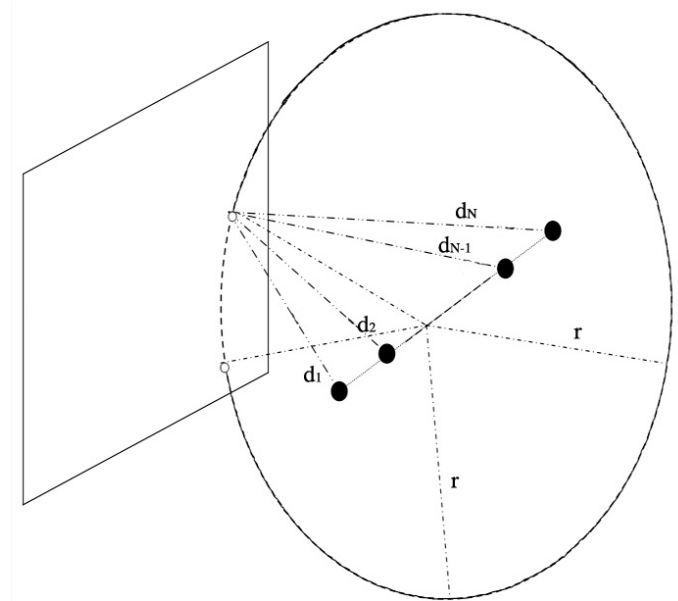
képlet alapján történik.

Így elméletben a mikrofonok időfüggvényéből kiindulva az egyes rácspontokban lévő pontforrások eredeti időfüggvényeihez hasonló időfüggvényeket kapunk.

A módszer előnye, hogy elvben kiszámíthatjuk vele az egyes adópontok hangsugárzásának időfüggvényeit, melyből megkaphatjuk az effektív hangnyomás-értékeket.

2.2.3. A mikrofonok elrendezése

Amennyiben a mikrofonosor egy egyenesre esik, és egy adott főirányba nézünk (a mikrofonokat a beamform rács egy adott pontjára irányítjuk), nem csak az abból a pontból érkező hanghullám jelei közt lép fel konstruktív interferencia, hanem a tér azon más pontjaiból érkező jelek közt is, melyek minden mikrofontól ugyanakkora távolságra helyezkednek el, mint a vizsgált rácspont [6]. Ezek a pontok egy kör mentén helyezkednek el, melynek középpontja a mikrofonosor tengelyén lesz, a kör sugara az adópont és a tengely távolsága. Ezt a 2.6 ábra szemlélteti.



2.6. ábra. A mikrofonok egy egyenes mentén való elhelyezése esetén több pontra fókuszálunk egyszerre

Ha a mikrofonok nem egy egyenesre, hanem egy síkba esnek, akkor egy beamform rácspontra való fókuszálás esetén azon kívül egyetlen másik pont lesz a térben, melyre szintén fókuszálunk. Ez a pont a fókuszpontnak a mikrofon síkjára vett tükörképe. A legtöbb esetben ez nem jelent zavaró körülményt, mivel általában nem található olyan hangforrás a mikrofonosor mögött, amely a mérést megzavarhatná.

Amennyiben a mikrofonok nem esnek egy síkba – például gömb elrendezésű alakzat esetén –, akkor még ez a zavaró körülmény is kiküszöbölhető. Ekkor a kívánt fókuszponton kívül nem lesz más pont a térben, amely minden mikrofontól ugyanakkora távolságra lenne, tehát amelyre szintén ráfókuszálnánk.

2.2.4. A véges és a végtelen fókusz távolságú nyalábformálás összehasonlítása

A véges fókusz távolságú nyalábformálás előnyei:

- a mikrofontömbnek nem kell a hangforrás távolterében elhelyezkednie;
- ennél a módszernél egy adott pontra fókuszálunk, és nem egy adott irányra;
- egy adott elrendezéssel nem csak egy szűk frekvenciatartományban mérhetünk, hanem szélesebb sávban, mivel a végtelen fókusz távolságú beamforminggal ellentétben nem szükséges a mikrofonok távolságának változtatása az egyes vizsgálni kívánt frekvenciatartományokhoz;
- ennek következtében a mérés kevesebb időt vesz igénybe;
- segítségével elméletileg visszaállíthatók az egyes adópontok eredeti hangnyomásának időfüggvényei.

A véges fókusz távolság legnagyobb hátránya, hogy csak akkor alkalmazható, ha pontosan ismerjük a hangforrás és a mikrofontömb távolságát.

A végtelen fókusz távolságú beamforming legfőbb előnye pedig, hogy akkor is használható, ha nem ismerjük pontosan ezt a távolságot. Nagy távolságban elhelyezkedő hangforrásoknál, illetve szabadtéri méréseknél szinte kizárólag ez a módszer alkalmazható.

3. fejezet

Különleges elrendezésű mikrofontömbök, térbeli aliasing

Ebben a fejezetben tárgyaljuk a térbeli aliasing jelenségét, valamint a nyálábformálással elérhető felbontást, majd bemutatunk többféle mikrofontömb elrendezési lehetőséget, és vizsgáljuk az azokkal elérhető melléknyaláb elnyomást, érzékenységi karakterisztikájukat, elrendezésük előnyeit, hátrányait.

3.1. Térbeli aliasing

Ha egy jelet T_S mintavételi idővel, azaz $f_S = \frac{1}{T_S}$ mintavételi frekvenciával mintavételezünk, akkor a mintavételezést követően a legmagasabb visszaállítható frekvenciát Nyquist frekvenciának hívjuk, amely $f_N = \frac{f_S}{2} = \frac{1}{2T_S}$ [3]. Ebből a Nyquist körfrekvencia:

$$\omega_N = \frac{2\pi f_S}{2} = 2\pi f_N. \quad (3.1)$$

Ehhez hasonlóan, amennyiben térben mintavételezünk egy jelet, és a mintavételi pontok egymástól d távolságra helyezkednek el, a térbeli Nyquist körfrekvencia, más néven Nyquist hullámszám:

$$K_N = \frac{\pi}{d}. \quad (3.2)$$

Az ennél nagyobb hullámszámú hanghullámok a térbeli mintavételezés után nem állíthatók vissza egyértelműen. A legkisebb hullámhossz, amely még visszaállítható [3]:

$$\lambda_{min} = 2 \cdot d. \quad (3.3)$$

Az ehhez tartozó legmagasabb frekvencia, ahol még nem jelentkeznek a térbeli aliasing jelensége, tehát elég sűrűn mintavételeztünk térben:

$$f_{max} = \frac{c}{\lambda_{min}} = \frac{c}{2d}. \quad (3.4)$$

Ez ekvivalens a második fejezetben bemutatott megfigyeléssel, miszerint végtelen fókusz-távolság esetén ahhoz, hogy ne jelenjenek meg a térbeli aliasing az iránykarakterisztikában, a mikrofonokat egymástól a legmagasabb frekvenciához tartozó hullámhossz felénél kisebb távolságra kell elhelyezni. Ez a szabály véges fókusz-távolság esetén is érvényes.

A térbeli aliasing tehát azt jelenti, hogy az iránykarakterisztikában melléknyalábok jelennek meg, amelyek majdnem ugyanakkorák, vagy ugyanakkorák, mint a főnyaláb. Ezek tévesen azt a hitet kelthetik, hogy abból az irányból is érkezett a megadott frekvenciájú hang.

Általánosságban, azok a jelek, melyek frekvenciája $f \pm p \cdot f_S$, ahol $p = 1, 2, 3 \dots$ nem különböztethetőek meg, ha az $f_S = 2f_N$ mintavételi frekvenciával mintavételezik őket, így mind jelen vannak f frekvencia vizsgálatakor.

Ehhez hasonlóan azok a síkhullámok, melyek Nyquist hullámszáma $K \pm p \cdot K_S$, ahol $p = 1, 2, 3 \dots$ nem különböztethetőek meg, amennyiben $K_S = 2K_N$ térbeli körfrekvenciával mintavételezik őket, és ebből következően mind részt vesznek a becslésben, ha ezek közül bármelyiket is vizsgálni szeretnénk a mintavételezett hangtérben [3].

3.2. A nyalábformálással elérhető felbontás

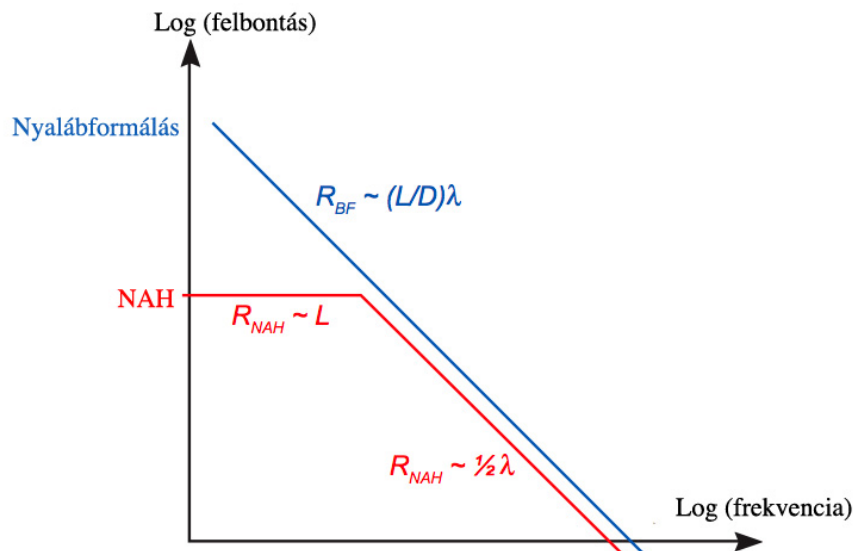
Nyalábformálás esetén a felbontást úgy definiáljuk [4], mint az a két, azonos erősséggel rendelkező hangforrás közti legkisebb távolság, amely esetén a hangforrások még megkülönböztethetőek.

Ez a felbontás arányos a hullámhosszal, nagysága durván:

$$R \approx 1.22 \cdot \frac{L}{D} \cdot \lambda, \quad (3.5)$$

ahol L a mikrofontömb és a vizsgált felület távolsága, D a mikrofontömb átmérője (legnagyobb mérete), λ pedig a hullámhossz. Látható, hogy a beamforming felbontása arányos a mérési távolsággal. Mivel a mérési távolság tipikusan nagyobb, mint a mikrofontömb átmérője, ezért a felbontás általában nem jobb, mint a vizsgált hullámhossz, ez pedig gyakran nem elfogadható alacsony frekvenciák esetén.

Ilyenkor közeltéri akusztikus holográfia (NAH) alkalmazható, melynek felbontása nagy frekvenciák esetén körülbelül megegyezik a hullámhossz felével. Ez jobb, mint a nyalábformálással elérhető felbontás. Alacsony frekvenciák esetén viszont a felbontás sosem lesz rosszabb, mint a mikrofontömb és a vizsgált felület távolsága (L). Mivel NAH alkalmazása esetén a forráshoz nagyon közel mérünk, alacsony frekvenciákon jó felbontás érhető el vele. Ezt a 3.1 ábra szemlélteti.



3.1. ábra. A beamforminggal és a közeltéri akusztikus holográfiával elérhető felbontás összehasonlítása [4]

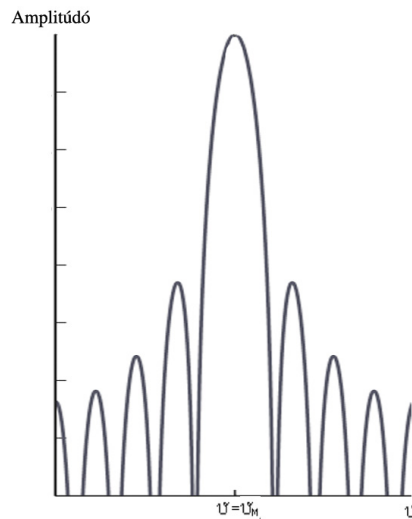
3.3. A mikrofontömb elrendezése

A nyalábformálás minősége nagyban függ a mikrofontömbök elrendezésétől. A kialakítás meghatározza a maximális melléknyalábok nagyságát. Egy adott elrendezés kialakításakor a megoldandó feladat az, hogy úgy tervezzük meg a mikrofonok elhelyezkedését, hogy az a kívánt frekvenciákon és felbontásban a legjobb oldalhullám-elnymást valósítsa meg. A mikrofontömbök megfelelő elhelyezésére a szakirodalmak több lehetőséget és

megoldást említenek [3,4], a következőkben ezeket tekintjük át.

3.3.1. Egyenletes vonalmenti elhelyezkedés

A legegyszerűbb mikrofontömb elrendezés a mikrofonok egyenletes elhelyezése egy vonal mentén. Ezzel az elrendezéssel nem pásztázhatjuk végig az egész térrészt, az így kapott eredmények csak egy vonal mentén határozzák meg a hangforrás irányát. Amennyiben egy szobában vízszintesen elhelyezzük ezt a mikrofontömböt, nem tudjuk vele megkülönböztetni a szobában a különböző magasságokból érkező hanghullámokat. Az ezzel az elrendezéssel kapható oldalnyalábok alakulását a 3.2 ábra szemlélteti.



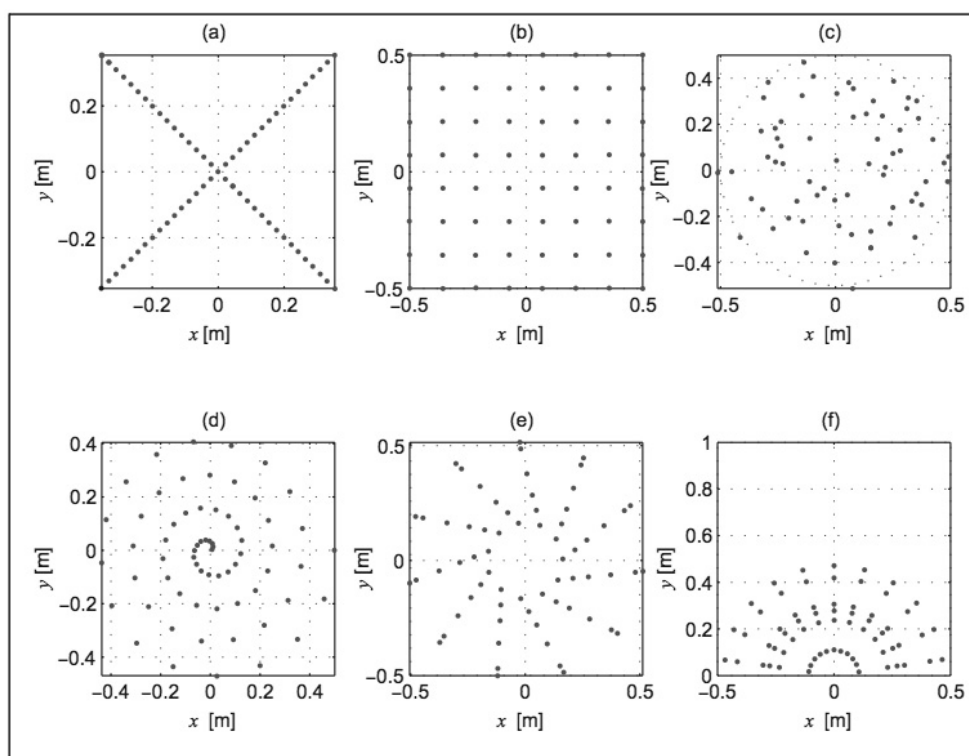
3.2. ábra. A melléknyalábok alakulása egyenletes, vonalmenti elrendezés esetén [3]

A 3.2 ábrán látható, hogy a mikrofonok egy egyenes mentén történő elhelyezésével kapott iránykarakterisztikán meglehetősen nagyok az oldalnyalábok, így az érzékenységi szög nagy. Túl magas frekvenciákon a térbeli aliasing is megjelenik. Ezek javítására irreguláris elrendezésű mikrofontömbök alkalmazhatók.

3.3.2. A mikrofontömb szabálytalan kialakítása

Ahhoz, hogy jó oldalnyaláb-elnyomást érhessünk el, valamint a térbeli aliasing jelensége se lépjen fel, irreguláris, tehát szabálytalan elrendezések javasoltak. Az ilyen kialakítások tipikusan kerék, spirál, vagy véletlenszerű elrendezések. A lehetséges elrendezéseket a 3.3 ábra szemlélteti.

A 3.3 ábrán az *a*, kialakítás kereszt, *b*, rács, *c*, optimalizált véletlenszerű, *d*, spirál, *e*, kerék, *f*, félkerék elrendezés.



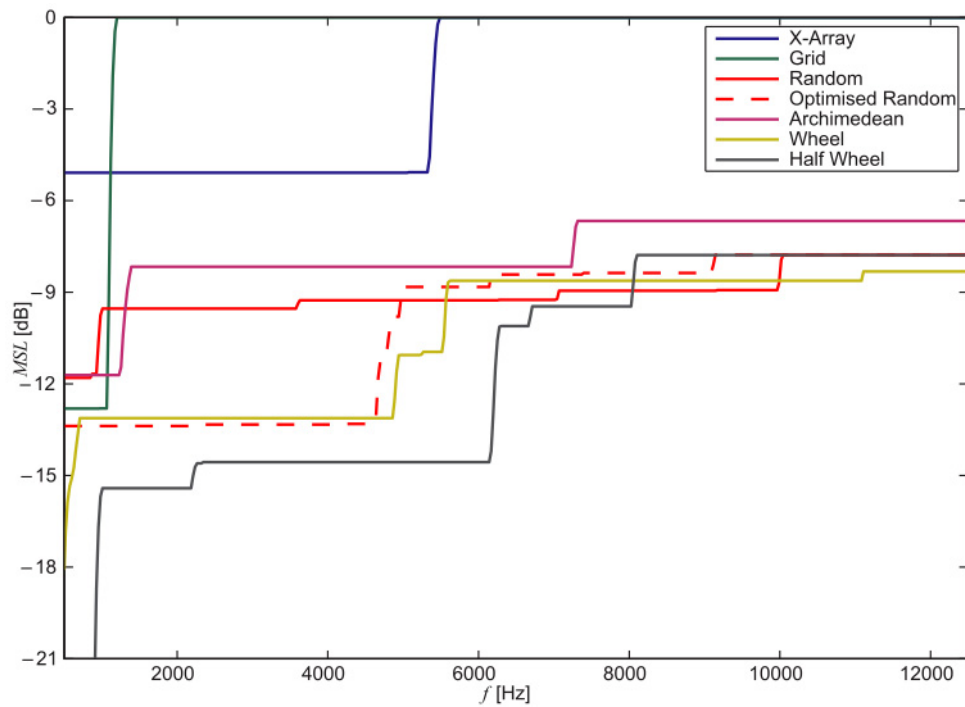
3.3. ábra. Lehetséges hagyományos és szabálytalan mikrofontömb kialakítások [3]

Az irreguláris kialakítások legnagyobb előnye a jó oldalhullám-elynyomás. Ennek mértékét Maximum Slidelobe Level (MSL)-nek hívják, mely maximális melléknyaláb szintet jelent, és azt mutatja meg, hogy mekkora a legnagyobb melléknyaláb szintje a főnyalábhoz viszonyítva. Az MSL-t az egyes mikrofontömb-kialakításokra általában a frekvencia függvényében ábrázolják, ezt a 3.4 ábra mutatja.

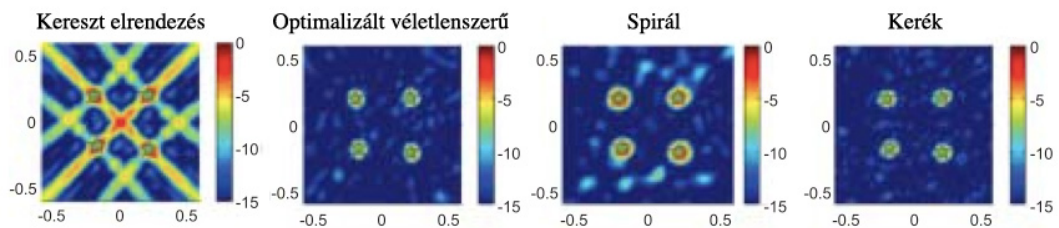
A 3.4 ábrán látható, hogy a frekvencia növekedésével a maximális oldalnyalábok nagysága nő minden elrendezés esetén. A hagyományos kialakítások esetén (rács és kereszt) a Nyquist hullámszámnak megfelelő maximális frekvencia felett a legnagyobb oldalnyaláb magassága megegyezik a főnyaláb szintjével.

A szabálytalan kialakításoknál is növekszik az MSL szint a frekvencia növekedésével, de alacsonyabb szinten marad, mint a főnyaláb, és még magas frekvenciákon sem jelentkezik a térbeli átlapolódás. Ennek szemléltetésére a 3.5 ábrán egy kereszt, egy optimalizált véletlenszerű, egy spirál, valamint egy kerék elrendezésű mikrofontömbbel készült akusztikai képek láthatók. A szimulációban 4 darab, egyenként 5 kHz frekvenciájú hangszórót helyeztek el a mikrofontömbbel szemben, attól 1 m távolságra. Az ábrák 0 dB-re vannak normálva.

A 3.5 ábrán megfigyelhető, hogy a kereszt kialakítású mikrofontömb akusztikai képé-



3.4. ábra. Maximális oldalnyaláb szint (MSL) a frekvencia függvényében, különböző elrendezések esetén, a következő jelölésekkel: X-array: kereszt, Grid: rács, Random: véletlenszerű, Optimised Random: optimalizált véletlenszerű, Archimedean: spirál, Wheel: kerék, Half Wheel: félkerék elrendezés [3]



3.5. ábra. Különböző elrendezések esetén látható akusztikai képek [3]

ben az ábra közepén az egyes melléknyalábok erősítik egymást. A szabálytalan kialakítások esetén a mikrofonok helye jól kivethető, az oldalnyaláb-szintek alacsonyabbak, mint a reguláris elrendezés esetében.

A kerék elrendezést a Brüel & Kjaer cég mérnökei fejlesztették, nagy előnye, hogy alacsonyabb frekvenciákon is jobb oldalnyaláb-elnomás érhető el vele, más szabálytalan kialakításokhoz képest [3].

Az irreguláris kialakítású mikrofontömbök kialakítása költséges. A kialakítás másik nehézsége, hogy a bonyolult geometria miatt a jelátalakítást végző egység és a kábelezés megvalósítása nehézkes, valamint bonyolult az üzemeltetés. Ezen kívül, a nagy mérési távolságokban igényelt magas felbontás miatt sokszor relatív nagy méretű kialakítás szükséges, mely átmérőben több métert is jelenthet. Mindezek a szállíthatóság, az össze-
szerelési, valamint szétszerelési idő rovására mennek, és a költségek jelentős növekedéséhez vezetnek.

Összefoglalásként elmondható, hogy irreguláris elrendezést alkalmazva jobb és megbízhatóbb eredmények érhetőek el a hagyományos elrendezéshez képest mind végtelen, mind véges fókusztávolságú nyalábformálás esetén. Egy ilyen kialakítással sokkal szélesebb frekvenciatartomány vizsgálható a térbeli aliasing megjelenése nélkül, és jobb melléknyaláb-elnomás érhető el adott mikrofonszám mellett. Hátránya a magas ár, hosszú tervezési idő, és a bonyolult kialakítás.

4. fejezet

Szimuláció elkészítése

A mikrofonokból álló akusztikai kamerarendszer megépítése előtt MATLAB-ot használva elkészítettem az iránymeghatározó algoritmust megvalósító programot. Ezt használtam fel később a valós, mért adatok kiértékeléséhez, a szimuláció során pedig az eredmények elemzésével vizsgáltam egy ilyen rendszer működését különböző beállítások mellett.

4.1. Iránymeghatározó algoritmus választása

Feladatom egy olyan algoritmus implementálása, szimuláció elkészítése, és egy 8 mikrofontól álló mikrofontömb megépítése volt, mellyel közepes méretű szobában lokalizálhatjuk a hangforrás irányát. Mivel egy ilyen helyen feltételezhető, hogy nem ismerjük pontosan a mikrofontömb és a hangforrás távolságát, azt beamform rácokra felosztva; a véges fókusz távolságú nyalábformálás nem alkalmazható hatékonyan.

Közeltéri akusztikus holográfiával sem lehet megfelelő lokalizációt megvalósítani, mivel ahhoz a hangforrástól való nagyon kis távolságra van szükség, vagy nagyon sok mikrofonra, mely feltételek közül egyik sem teljesül esetünkben, ezért kézenfekvő megoldás a végtelen fókusz távolságú nyalábformálás alkalmazása.

A végtelen fókusz távolságú beamforming jól alkalmazható kisebb szoba, és nem nagy számú (8 darab) mikrofon esetén, amennyiben a forrás a vevő távolyterében helyezkedik el, és az pontszerűnek tekinthető, a hanghullámok pedig síkhullámoknak vehetők. A műszaki akusztikában távolyternek számít az a távolság [6], melyre teljesül, hogy

$$\beta \cdot r \gg 1, \tag{4.1}$$

ahol r a hangforrástól mért távolság, β a hullámszám. Ekkor a hangnyomás és a részecske

sebessége fázisban vannak, így síkhullámról beszélhetünk. A feltétel összetett hangforrás esetén:

$$\beta \cdot r \gg d_{max}, \quad (4.2)$$

ahol d_{max} a hangsugárzó legnagyobb lineáris mérete. A mérésen használt hangsugárzók esetén ez kisebb, mint 50 cm, ezért a pontforrásra érvényes feltétellel számolhatunk. Amennyiben a „sokkal nagyobb” relációt úgy értelmezzük, hogy legalább egy nagyságrend a különbség, a következő feltételt kapjuk:

$$\beta \cdot r > 10, \quad (4.3)$$

vagyis $\frac{2\pi r}{\lambda} > 10$, tehát $r > \frac{10\lambda}{2\pi}$. Ebből következik, hogy

$$f > \frac{10c}{2\pi r}, \quad (4.4)$$

ahol c a hang terjedési sebessége, f a hangfrekvencia, λ a hullámhossz. Amennyiben egy közepes méretű szobában szeretnénk lokalizációt végezni, a forrás és vevők közti távolság minimum 3 méternek vehető. Ekkor a hanghullámok síkhullámnak tekinthetők, amennyiben a frekvenciájuk nagyobb, mint 182 Hz. Ez elfogadható korlátozás a vizsgálható frekvenciára nézve. A lokalizációs algoritmus megvalósításához így a végtelen fókusz távolságú nyalábformálás alkalmazható.

4.2. A szimuláció megvalósítása, működése

A szimulációt kétféle esetre valósítottam meg. Amennyiben a mikrofonokat egy vonal mentén helyezük el, az iránymeghatározás egy dimenzió mentén történik. Ezen kívül a szimulációt elkészítettem arra az esetre is, amennyiben a mikrofonokat egy síkon bárhol elhelyezhetjük. Ekkor a vizsgált térrészről kétdimenziós akusztikai kép készíthető.

A szimulációhoz elkészített rendszer működése az alábbi módon történik:

- a mikrofonok helyzetének megadása (script.m fájlban);
- a hangsugárzó(k) helyzetének, frekvenciájának, a sugárzott hanghullám amplitúdójának megadása, és a mintavételi frekvencia megadása (script.m fájlban);

- a megadott adatok alapján a szimuláció kiszámítja a mikrofonok vett jelének időfüggvényeit (az időtartam megadható), és eltárolja azokat egy mátrixban (a szimulált mikrofonok és hangsugárzó(k) egymástól vett távolságának számítása, majd időfüggvények számítása a `calctable()` függvénnyel);
- a megadott adatok alapján a lokalizációs algoritmus a végtelen fókusz távolságú beamforming elvét alkalmazva meghatározza a hangsugárzók irányát a fizikailag értelmezhető 0-180° tartományban, a szögfelbontás megadható (`calcpattern()` függvény);
- az iránykarakterisztika ábrázolása vonalmenti iránymeghatározás esetén polárkoordináta-rendszerben, síkbeli iránymeghatározás esetén akusztikai képen történik (`polarfig()` függvény és `script.m` fájl);
- a megadott helyzetértékek alapján a program kiszámítja a hangsugárzók "valódi" irányát is (`calcrealpattern()` függvény), mely az eredményekkel összevethető. Ezen kívül meghatározza az érzékenységi szöget (`erzekenyseg()` függvény), és kiszámítja a látható tartomány hosszát.

Később, a valódi mérések megvalósítása során megírt MATLAB függvényekben a hangsugárzók helyzetének, frekvenciájának és amplitúdójának megadását, valamint a vett jelek időfüggvényeinek szimulálása helyett beolvastam a mért és .wav fájlokban tárolt adatokat.

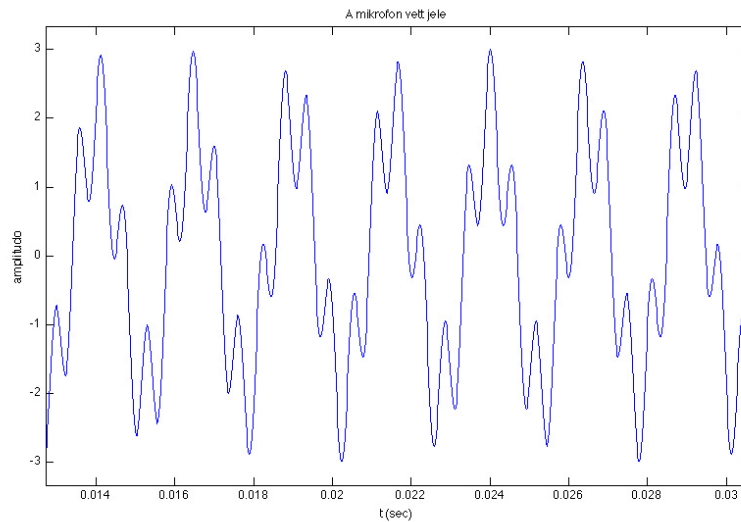
Amennyiben vonal menti iránymeghatározást végzünk, először megadjuk a mikrofonok számát és elhelyezkedését. Ehhez 8 mikrofont használtam, és egy egyenes mentén helyeztem el őket, egymástól 0.1 m távolságra. A hangsugárzó vagy hangsugárzók helye megadható, állítható a hangforrás erőssége (amplitúdó), valamint frekvenciája. A megadott adatok alapján a `calctable()` függvény kiszámítja a hangforrások és mikrofonok távolságát, majd az alábbi összefüggés alapján generálja a vett jelek időfüggvényét minden mikrofonokra:

$$y_m(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cdot \cos(2\pi \cdot f_k \cdot (t - \tau_k)), \quad (4.5)$$

ahol t a diszkrét időt, m az m -edik mikrofont jelöli, N a hangsugárzók száma, k a hangsugárzó indexe, f_k a k -edik hangsugárzó frekvenciája, τ_k azt jelöli, hogy az egyes mikrofonokhoz érkező hanghullám mekkora időkésséssel érkezik, az első mikrofonhoz viszonyítva. c a hang terjedési sebessége, $y_m(t)$ pedig az m -edik mikrofon vett jelének

időfüggvényét jelenti.

A mikrofonok időfüggvényeit a program egy mátrixban tárolja. Egy mikrofon vett jelének időfüggvénye (annak egy részlete), 44100 Hz mintavételi frekvencia, 400 Hz-es (amplitúdó: 2 egység) és 1720 Hz-es (amplitúdó: 1 egység) hangsugárzók esetén a 4.1 ábrán látható.



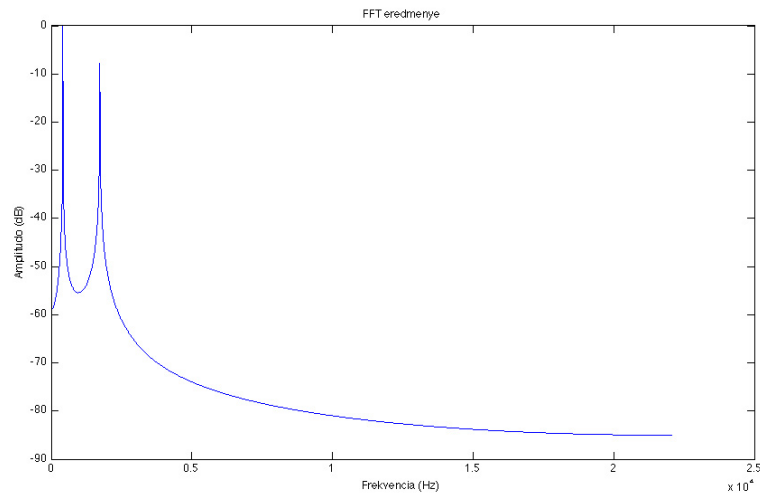
4.1. ábra. Egy mikrofon vett jelének időfüggvénye

Ezt követően, a számított értékek, és a megadott kívánt szögfelbontás alapján a `calc-pattern()` függvény lokalizációt végez, amely a végtelen fókusz távolságú nyalábformálás elvén alapul. Először kiszámítjuk a vett jelek időfüggvényének diszkrét Fourier-transzformáltját FFT segítségével. Az egyik mikrofon vett jelének amplitúdó karakterisztikája, az FFT normálásával a 4.2 ábrán látható.

Ezután megvizsgáljuk, milyen frekvenciákon érkezett hang. Ez az FFT értékeket tartalmazó mátrix abszolútértékeinek átlagával való vizsgálattal történik. Amennyiben ez az érték nagyobb egy megadható küszöbnél, úgy tekintjük, hogy az adott frekvencián érkezett hang, és a tér fokenkénti (vagy nagyobb felbontású) végigpásztázásával iránykarakterisztikát rajzolunk. Ez úgy történik, hogy elnézünk egy adott irányba, és megnézzük, hogy amennyiben onnan jött a hang, az egyes mikrofonokban ennek mekkora fáziskésést kellett okoznia az adott frekvencián. Ezzel a fáziskéséssel korrigáljuk az $F(\vartheta)$ függvényt:

$$F(\vartheta) = \sum_{k=1}^N \frac{X_k}{X_1} \cdot e^{-j\varphi_k}, \quad (4.6)$$

ahol ϑ a vizsgált szög, $F(\vartheta)$ az iránykarakterisztika, N a mikrofonok száma, k a mikrofo-



4.2. ábra. Amplitúdó karakterisztika számítása a vett jelekre, 2 hangforrás esetén

nok indexe, X_k a k -adik mikrofon FFT értéke, φ_k pedig a k -adik mikrofon vett jelének az első mikrofontól vett számított fáziskülönbsége, abban az esetben, ha a hang a ϑ szöget meghatározó irányból érkezett.

Ekkor egy adott irányban $F(\vartheta)$ abszolútértéke lesz az iránykarakterisztika egy adott helyen. Az alkalmazás megvalósítja a végtelen fókusz távolságú nyálábformálást. Tekinthetjük úgy, hogy ϑ_M (a főirány, tehát a vett jel beérkezési szöge) adott, és ezt úgy keressük, hogy ϑ -t változtatva végigpásztázzuk a teret, az iránykarakterisztikát pedig $F(\vartheta)$ számításával végezzük. Amennyiben $\vartheta = \vartheta_M$, akkor $\frac{X_k}{X_1} \cdot e^{-j\varphi_k} = 1$ minden k -ra, így

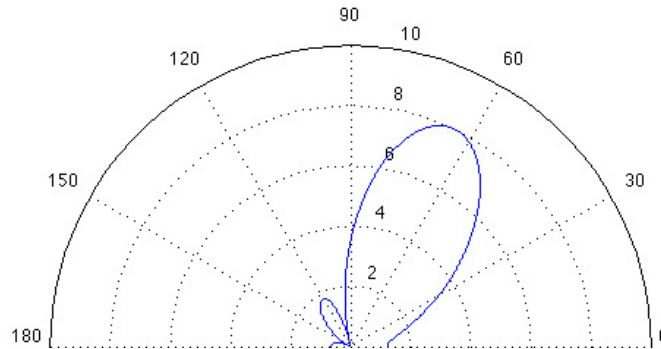
$$|F(\vartheta)| = \sum_{k=1}^N 1, \quad (4.7)$$

azaz 8 mikrofon esetén $|F(\vartheta)| = 8$, ez a maximális érték, tehát a hangforrás ϑ_M szög által meghatározott irányból érkezett.

A függvények polárkoordináta-rendszerben ábrázolják az eredményeket, és kiszámítják az érzékenységi szöget (a főnyaláb két -6 dB-es pontja, és a főnyaláb maximumához tartozó ϑ érték által meghatározott egyenesek szögét), valamint meghatározzák a látható tartomány hosszát. Ezen kívül a `calcrealpattern()` függvény meghatározza a helyzetkoordináták alapján a hangforrás valódi irányát, így az eredmények összevethetők a "valódi" eredményekkel.

Első lépésként elhelyeztem 8 darab mikrofont egy egyenes mentén, egymástól 0.1 m távolságra, majd beállítottam egy 1 egység amplitúdójú, 650 Hz frekvenciájú hangforrást a mikrofonok távolterében, 65° főirányból. Tehát $d=0.1$ m, $N=8$, $A=1$, $f=650$ Hz, $\vartheta_M=65^\circ$.

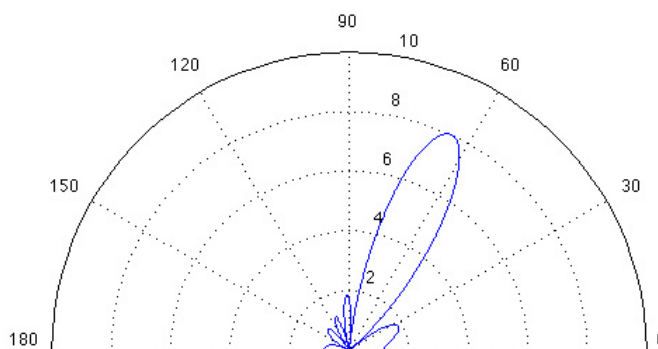
A kapott iránykarakterisztika polárkoordináta-rendszerben a 4.3 ábrán látható.



4.3. ábra. A kapott $|F(\vartheta)|$ iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=650$ Hz esetén

Látható, hogy $|F(\vartheta)|$ maximuma megegyezik a mikrofonok számának összegével. A maximumhelyet a függvény $\vartheta=65^\circ$ -nál veszi fel, így az iránymeghatározás megfelelően működött. Mivel a mikrofonok sokkal közelebb helyezkednek el egymáshoz, mint a hanghullámhossz fele (ami 0.26 m), ezért a látható tartomány hossza kisebb, mint 2π . Az érzékenységi szög 52.1° .

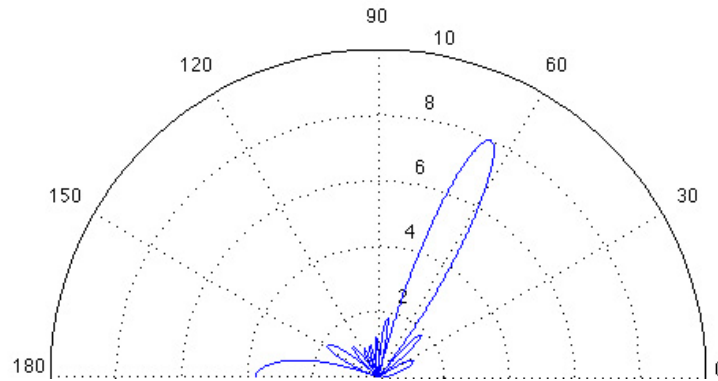
Amennyiben a mikrofonok távolságát 0.2 m-re állítjuk, a kapott eredményeket a 4.4 ábra mutatja.



4.4. ábra. Az iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.2$ m, $f=650$ Hz esetén

Az iránymeghatározás így is jól működik, a kapott eredmény $\vartheta=65^\circ$. A látható tartomány hossza 4.76, az érzékenységi szög 22.3° . A látható tartomány hossza növekedett, de még mindig nem ismétlődik (teljesül a $d < \frac{\lambda}{2}$ feltétel). Az érzékenységi szög kisebb, mint az előző esetben.

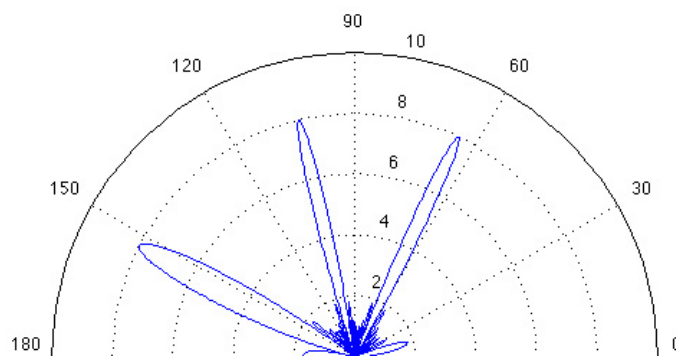
Nézzük meg, mi történik, ha a mikrofonok távolságát tovább növeljük. Amennyiben $d=0.34\text{ m}$, $d > \frac{\lambda}{2}$, a látható tartomány hossza 8.09, így $F(\vartheta)$ -ban $|F(\Psi)|$ egyes szakaszai ismétlődnek. A kapott eredmények polárkoordináta-rendszerben a 4.5 ábrán láthatók.



4.5. ábra. A kapott iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.34\text{ m}$, $f=650\text{ Hz}$ esetén

Látható, hogy egy nagyobb oldalnyaláb jelent meg a karakterisztika szélén.

Amennyiben d -t sokkal nagyobbra választjuk, mint a félhullámhossz fele (0.26 m), az iránykarakteristikában több főnyaláb is megjelenik, tehát a lokalizáció nem működik megfelelően. A $d=0.8\text{ m}$ elemtávolság megválasztásával kapott eredmények a 4.6 ábrán láthatók.



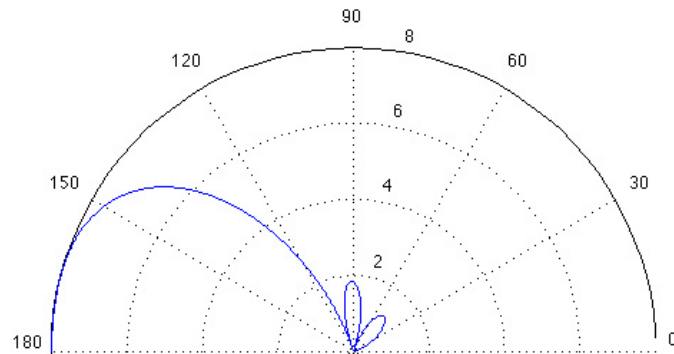
4.6. ábra. A kapott iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.8\text{ m}$, $f=650\text{ Hz}$ esetén

Az iránykarakteristikában ekkor több főnyaláb is megjelenik, ami azt jelenti, hogy olyan irányokból is érzékelünk hangforrásokat, ahol valójában nincsenek. Ez a térbeli aliasing. Megfigyelhető továbbá, hogy a főnyaláb érzékenységi szöge tovább csökkent.

Amennyiben a hangforrás a vizsgált térrész széléhez közel helyezkedik el, megfigyel-

hető, hogy ugyanolyan beállítások mellett megnő az érzékenységi szög a térrész közepéhez való elhelyezkedéshez képest, a főnyaláb "felpúposodik".

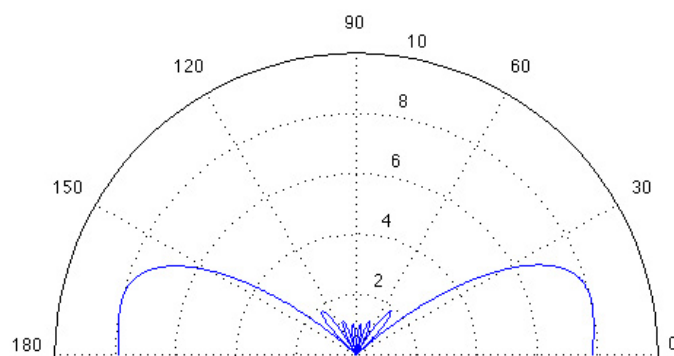
A hangforrás irányát 169° -nak választva, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=650$ Hz, $A=1$ esetén az iránykarakterisztika a 4.7 ábrán látható.



4.7. ábra. Az iránykarakterisztika 169° -os főirányból, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=650$ Hz esetén

A lokalizációs algoritmus itt már 2° -ot tévedett, 167° -ot eredményül adva. Az érzékenységi szög 54.7° .

Amennyiben a mikrofonok elemtávolságát ebben az esetben picit nagyobbra választjuk, mint a félhullámhossz fele, egyből megjelenik a térbeli aliasing, és hamis főnyalábok láthatók. Az elemtávolság $d=0.27$ m-re való választása, valamint a hanghullámok 169° -os szögből érkezése esetén az iránykarakteristikát a 4.8 ábra mutatja.



4.8. ábra. Az iránykarakterisztika 169° -os főirányból, $N=8$, $d=0.27$ m, $f=650$ Hz esetén

A 4.8 ábrán látható a térbeli aliasing jelensége.

Összegzésként elmondható, hogy egyenlő távolságú mikrofonosor esetén minél nagyobbra

választjuk a mikrofonok távolságát, annál kisebb érzékenységi szög érhető el. Amennyiben a mikrofonok egymástól vett távolsága meghaladja a hanghullámhossz felét ($d > \frac{\lambda}{2}$), $|F(\Psi)|$ ismétlődik, és több főnyaláb jelenhet meg az iránykarakterisztikában.

Több mikrofon elhelyezésével jobb irányítottság, és kisebb érzékenységi szög érhető el. Fontos megjegyezni továbbá, hogy túl kicsi vagy túl nagy szögű főirány esetén az irányítottság romlik, az érzékenységi szög nő, a mikrofonok egymástól vett távolságának növelésével nagyon hamar megjelennek a hamis főnyalábok.

A szimulációt elkészítettem arra az esetre is, amennyiben a mikrofonokat egy síkon bárhol elhelyezhetjük. Ekkor a vizsgált térrészről kétdimenziós akusztikai kép készíthető, mellyel a hangforrás iránya egy közepes méretű szobában jól meghatározható.

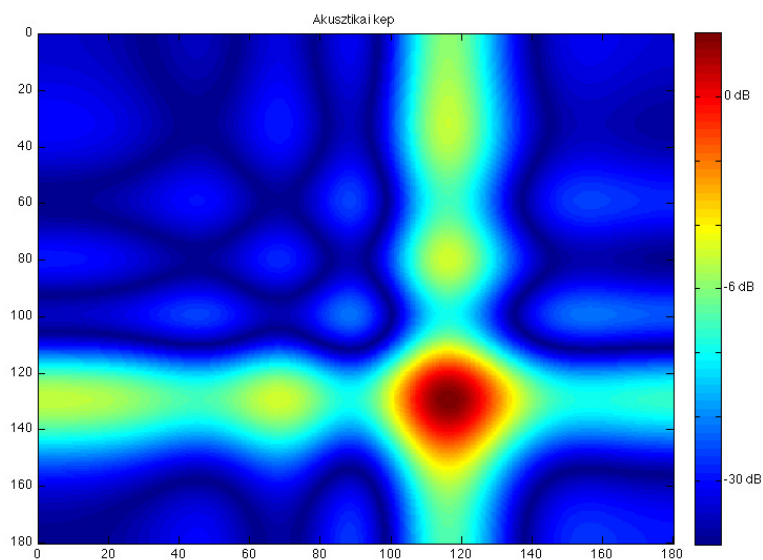
Az algoritmus minden vízszintes, és függőleges szögtartomány-párt végigpásztázva alkalmazza a végtelen fókusz távolságú nyalábformálást, a kapott iránykarakterisztikát egy mátrixban tárolva. Ebből egy kétdimenziós ábrát rajzol, melyen minden értéket annak megfelelően színez, amekkora a hozzá tartozó $|F(\vartheta, \delta)|$ érték, ahol ϑ a vízszintes, δ a függőleges szögtartomány. Itt is teljesülnek azok a következtetések, melyeket egyetlen szögtartomány pásztázásakor tettünk.

A következő szimuláció során az alábbi értékeket használtam: elhelyeztem egy hangszugárzót a mikrofontömbtől vízszintesen 117° , függőlegesen 130° irányban. 16 elemű, kereszt elrendezésű mikrofontömböt használtam, melyek egymástól 0.2 m távolságra helyezkednek el. A hangforrás frekvenciája 650 Hz, az amplitúdó $A=1$. A vízszintes és függőleges szögfelbontás 0.5° . A lokalizáció eredménye ekkor a 4.9 ábrán látható.

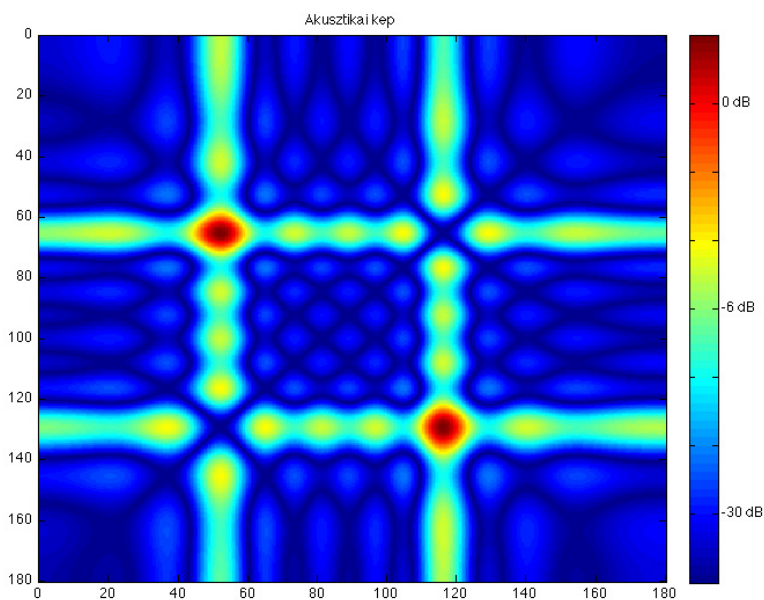
A 4.9 ábrán vörös színnel látható a hangforrás helye. A tengelyeken a vízszintes és függőleges szögtartományok láthatók. Az akusztikai kép úgy értelmezhető, hogy megmutatja a hangforrás irányát úgy, mintha szembenéztünk volna a hangforrással. Az ábra mellett látható skála mutatja az egyes színtartományokhoz tartozó dB értékeket. Kereszt elrendezés esetén a hangforrástól mind a négy oldalirányban oldalhullámok láthatók, mely az elrendezés sajátosságának következménye.

Amennyiben a mikrofonok távolságát nagyobbra választjuk, mint a hanghullámhossz fele, megjelenik a térbeli aliasing. Ezt a 4.10 ábra szemlélteti, $d=0.5$ m, $f=650$ Hz esetén.

A mikrofonok számának növelésével kereszt elrendezés esetén csökken az érzékenységi szög, viszont a magasabb oldalnyalábok ugyanúgy megjelennek. A mikrofonok számának csökkentésével nő az érzékenységi szög.

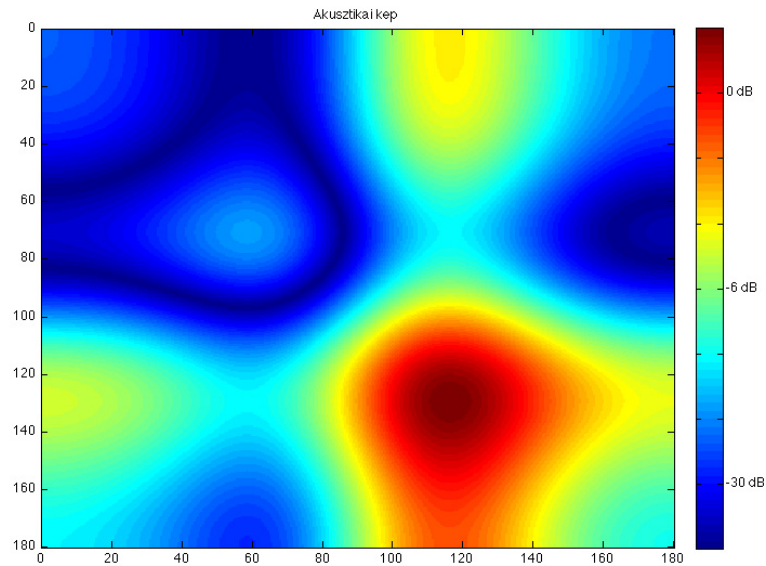


4.9. ábra. A készített akusztikai kép kereszt elrendezésű mikrofontömb esetén, $N=16$, $d=0.2$ m, $f=650$ Hz esetén



4.10. ábra. A hangforrás akusztikai képe, $N=16$, $d=0.5$ m, $f=650$ Hz esetén

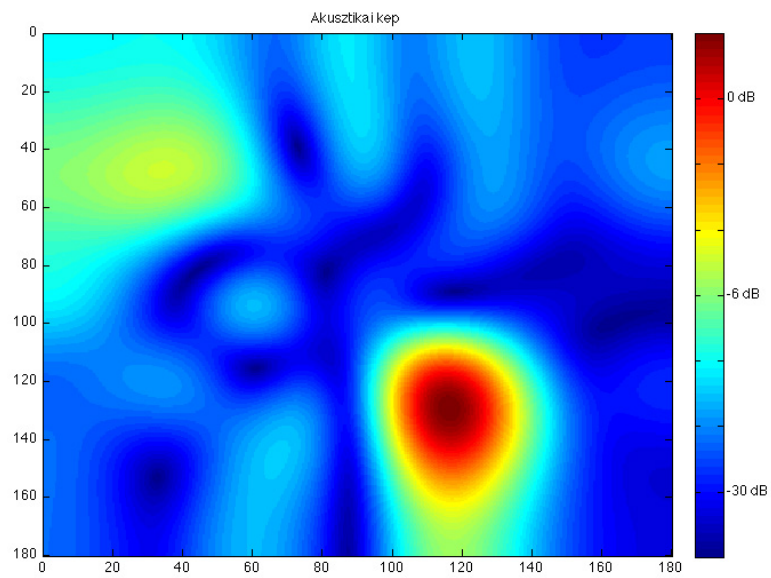
8 mikrofon kereszt elrendezése esetén, $d=0.2$ m elemtávolság mellett, $f=650$ Hz-en az eredmények a 4.11 ábrán láthatók.



4.11. ábra. A készített akusztikai kép kereszt elrendezésű mikrofontömb esetén, $N=8$, $d=0.2$ m, $f=650$ Hz

A 4.11 ábra mutatja, hogy kevesebb mikrofon alkalmazásával nő az érzékenység szöge, és nagyobb oldalnyalábok jelennek meg. Ezek csökkentése más, például véletlenszerű mikrofontömb-elrendezéssel valósítható meg. A 4.12 ábrán egy olyan elrendezéssel készült akusztikai kép látható, amely 16 mikrofont tartalmaz, melyek véletlenszerű elhelyezésűek.

Az oldalnyalábok csökkentek, mindössze a kép bal felső oldalán látható egy magasabb nyaláb. A véletlenszerű elrendezés miatt az akusztikai kép különböző részein láthatók melléknyalábok, melyek a mikrofonok számának növelésével tovább csökkenthetők, és a főnyaláb érzékenységi szöge is csökken.



4.12. ábra. A hangforrás akusztikai képe, véletlen elhelyezésű mikrofonok esetén, $N=16$, $f=650$ Hz

5. fejezet

Az irányméréshez használt rendszer elkészítése

Az iránymérő rendszer elkészítéséhez a tanszéken rendelkezésre állt egy 8 csatornás erősítő, valamint egy 10 csatornás USB audio interfész. A mikrofontömböt úgy készítettük el Horváth Gergely hallgatóval együtt, hogy ezeket az eszközöket felhasználhassunk a rendszerhez. Ezért, a legjobb kihasználhatóság érdekében 8 mikrofonból álló mikrofontömböt terveztünk és építettünk meg. 8 mikrofonnal a szimulációk eredménye alapján, valós környezetben egy vonal mentén (tehát egy vízszintes síkban értelmezhető szöveget kapva eredményül), a várható zajokat is figyelembe véve jól végezhető iránymeghatározás.

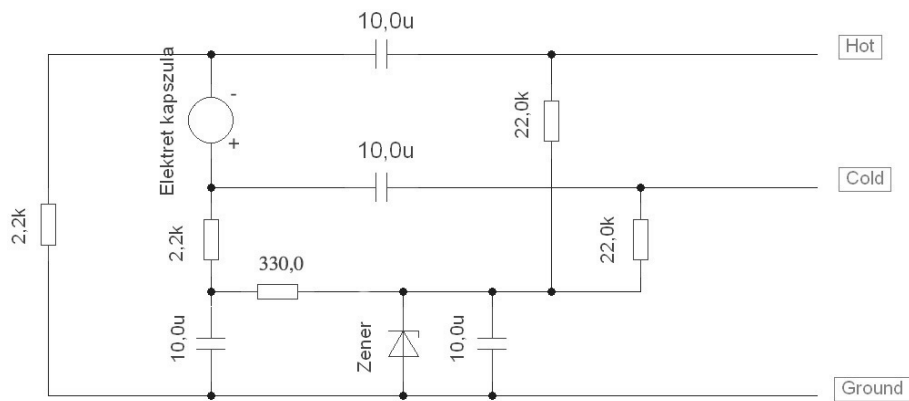
A mikrofontömb elkészítéséhez elektret mikrofonokat tartalmazó áramkört valósítottunk meg, az egyes csatornák jeleit erősítve, valamint az USB audio interfész alkalmazásával jelenítettük meg és tároltuk PC számítógépen, azon Audacity programot használva.

Az elektret mikrofonok hasonlóak a kondenzátor mikrofonhoz. Nem igényelnek előfeszítést [12], mert a mikrofon membránját a gyártás során polarizálták. Nagy impedanciás előerősítésre van szükségük. A kondenzátor mikrofonoknál egyszerűbbek és olcsóbbak, főként stúdiókban és hangosításban használják őket.

5.1. A prototípus és a mikrofontömb megépítése

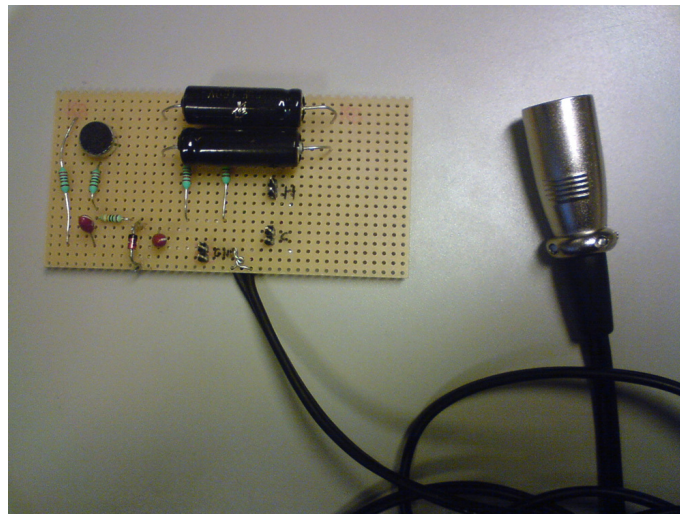
Az elkészített mikrofontömb 8 darab mikrofonból állt, melyek elektret mikrofonokat tartalmaznak [13]. Egy mikrofont tartalmazó áramkör kapcsolási rajza az 5.1 ábrán látható.

Az áramkör kiegyenlített jeleket ad ki, és 2 kOhm körüli kimeneti impedanciával rendelkezik, mely lehetővé teszi, hogy több méteres hosszabbító kábelt alkalmazzunk. A



5.1. ábra. Egy elektret mikrofont tartalmazó áramkör kapcsolási rajza

megvalósítás során először megépítettük az áramkör egy prototípusát, majd vizsgáltuk annak átvitelét. A prototípust az 5.2 ábra mutatja.



5.2. ábra. Egy elektret mikrofont tartalmazó áramkör prototípusa

A prototípus megépítése után bemértük, hogy az áramkör a kívánt feladatnak megfelelően működik-e. Ehhez kivettük a mikrofont az áramkörből. A kivétel előtt megmértük a mikrofon lábain eső feszültséget, mely erősítést követően 10.2-10.5 V közötti értéknek adódott, attól függően, mennyire érte hang a mikrofont.

Ezt követően eltávolítottuk a mikrofont, és Wayne Kerr Precision Component Analyzer 6425 segítségével megmértük az impedanciáját, 10 V feszültséget ejtve rajta. Az impedancia egy kapacitásnak adódott. Ezután a kivett elektret mikrofon helyére függ-

vénygenerátort helyeztünk, és sinusjellel gerjesztettük az áramkört. Az oszcilloszkópot nagy kimeneti impedanciás állásba állítottuk. A Hot és Cold lábakon kapott jelalakot oszcilloszkóppal vizsgáltuk, a Cold láb jelét invertálva, majd összeadva a Hot láb jelével egy sinusjelet kaptunk. Az átvitel vizsgálatára több frekvencián végeztünk méréseket, a karakterisztika felüláteresztő jellegűnek adódott, 1 Hz alatti törésponti frekvenciával. Az elméleti törésponti frekvencia:

$$f_{\text{törésponti}} = \frac{1}{2\pi \cdot RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^{-5} \cdot 22 \cdot 10^3} = 0.72 \text{ Hz}, \quad (5.1)$$

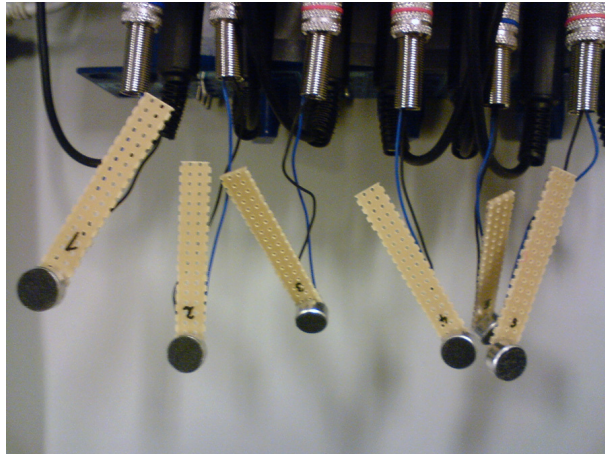
ahol R a felüláteresztő szűrő tag ellenállása, C a kapacitása. Ezzel megállapítható, hogy a prototípus alkalmas a feladatra, ahol alacsony frekvenciás jelek mérésére is szükséges lesz.

A 8 mikrofont tartalmazó mikrofontömb egyes elemeit, az áramkört Horváth Gergely forrasztotta, az elektret mikrofonokat saját magam. A kész mikrofontömb az 5.3, a hozzájuk csatlakozó elektret mikrofonok az 5.4 ábrán láthatók.



5.3. ábra. Az elkészített mikrofontömb a mikrofonokkal

Az elektret mikrofonokat olyan műanyaglapokra forrasztottuk, melynek segítségével könnyen és pontosan felszegezhetők egy hosszú fapálcára. Az mikrofonok nincsenek közvetlenül a házban található áramkörökhöz forrasztva, ahhoz RCA csatlakozóval csatlakoztathatók, így lehetőség van tetszőleges hosszúságú hosszabbító kábel használatára.



5.4. ábra. Elektret mikrofonok

5.2. Az áramkör működésének vizsgálata

A mikrofontömb kialakítása után elvégeztem működésének vizsgálatát. A mérés során az egyes mikrofon-áramköröket csatornánként csatlakoztattam a 8 csatornás OneWay RT03 Octal MIC Preamp erősítő egységhez, 42 dB erősítést beállítva.

Az erősített jeleket csatornánként csatlakoztattam a 10 csatornás Roland Cakewalk UA-101 típusú, 24 bites, 192 kHz mintavételi frekvenciát biztosító audio interfészhez. Az audio interfész USB kapcsolaton keresztül PC-hez csatlakoztatható, a digitalizált jeleket PC felé továbbítja. Az egyes mikrofonok jelalakja így PC-n megjeleníthető, és rögzíthető. A mikrofonok jelének rögzítésére Audacity programot használtam. Az egyes csatornák jeleit .wav fájlalba mentve, MATLAB-ban beolvasva és feldolgozva, offline módon végeztem el az iránymeghatározást.

Az Audacity programmal felvettem a készített áramkörrel vett jeleket, és visszahallgattam őket. Az egyes csatornákat külön-külön és együttesen is vizsgáltam, megfelelő működést, illetve áthallást vizsgálva. Áthallást úgy vizsgáltam, hogy bekötöttem minden csatornát az erősítőbe és az audio interfészbe is, de csak egy csatornához csatlakoztattam mikrofont. Az erősítőhöz, valamint a 8 csatornás USB audio interfészhez csatlakoztatott áramkört az 5.5 mutatja.

A mérések során a rendszer megfelelően működött, az egyes csatornák jól hallhatóak voltak, áthallást nem tapasztaltam, így következhetett a valódi mérések megvalósítása, és az iránymeghatározás.



5.5. ábra. A mikrofontömböt, erősítőt, és 10 csatornás USB audio interfészt tartalmazó rendszer

6. fejezet

Íránymeghatározás az elkészített rendszer alkalmazásával

Az íránymeghatározáshoz összeállítottam a rendszert egy közepes méretű tanteremben. Amennyiben egy közepes méretű szobában szeretnénk hangforrást lokalizálni végtelen fókusz-távolságú nyalábformálást alkalmazva, a mikrofonok közti elem-távolság változtatása szükséges annak függvényében, hogy milyen frekvencián végzünk íránymeghatározást. A legkisebb vizsgálható frekvencia a távotérrel kapcsolatos korlát miatt körülbelül 182 Hz. A maximális vizsgálható frekvencia egymáshoz nagyon közel elhelyezett mikrofonok esetén a hangfrekvenciás tartomány felső határa. A nagyobb frekvenciák hátrány, hogy az egymáshoz közelebb elhelyezett mikrofonok miatt, a mikrofonok elhelyezésének kis hibájával sokkal jobban elrontjuk a mérést, mint kisebb frekvenciákon történő mérés esetén.

Mivel a mikrofonok jelén kisebb zaj ül, nem érdemes mind a 8 mikrofont síkban elhelyezni és síkbeli íránymeghatározást végezni, mivel az így elérhető pontosság, felbontás, érzékenységi szög, a zajt is figyelembe véve rossz. Ezért a mikrofonokat egy egyenes mentén helyeztem el, így a mikrofontömböt vízszintesen elhelyezve egy vízszintes síkban értelmezhető szöget kaptam az íránymeghatározás eredményéül. A mikrofonokat egymástól egyenlő távolságra helyeztem el, a véletlenszerű elrendezés frekvencia-, és írányfüggő lokális maximumait elkerülve.

Amennyiben a hangforrást síkban szeretnénk lokalizálni ezzel a rendszerrel, 2 különböző mérés szükséges: először egy vízszintes síkban való mikrofontömb-elhelyezéssel, majd függőleges síkban történő méréssel, a független eredményeket összegezve kapható kétdimenziós akusztikai kép. Mivel a két mérés az elhelyezésen (a mikrofonosor 90°-os elforgatásán) kívül egymással mindenben megegyezik, eredményeik függetlenek, és a

függőleges beállítás nagy pontosságot igényel (a mikrofonsor középpontja meg kell hogy egyezzen mindkét esetben), méréseimet a vízszintes síkban történő elhelyezésre korlátoztam, azt részletesen megvizsgálva, egy vízszintes síkban értelmezhető szöget kapva az iránymeghatározás eredményéül.

6.1. Mérés, a hangforrás irányának meghatározása kisebb laborban

Az elkészített rendszerrel a Budapest Műszaki Egyetem IE 224 tantermében, és az egyik harmadik emeleti kisebb laborban végeztem méréseket. A labor kisebb méretű, míg a tanterem nagyobb. A méréseket nem süketszobában végeztem, mivel az nem állt rendelkezésre, így egyes esetekben megfigyelhető az eredményeken, hogy a reflexiók következtében hamis hangforrások-irányok is megjelentek a valódi hangforrás frekvenciáján.

A kisebb méretű laborban 2 hangsugárzót helyeztem el a mikrofonsortól eltérő távolságra, a mikrofonsort pedig az ablakhoz közel. A szoba, melyben az összeállítást elhelyeztem, a 6.1 ábrán látható.



6.1. ábra. A mérési elrendezés

A 6.1 ábrán látható a mikrofonsor az ablakhoz közel, mellette az mikroföntömb áramköri egysége, az erősítő, az analóg interfész és a notebook, ezekkel szemben pedig a két hangsugárzó. Az ábrán bal oldalon látható, *A* jelű hangsugárzó a mikroföntömbtől nézve (tehát szembenézve a hangsugárzókkal), a mikroföntömb egyenesével vízszintesen, $\vartheta_M=73^\circ$ -os szöget bezáró irányban helyezkedett el, míg az ábra jobb oldalán látható, *B*

jelű hangszugárzó $\vartheta_M=117^\circ$ -os szögben látszott. A mikrofonosor az A hangforrástól 2.5 méter, a B hangforrástól 3.4 méter távolságra helyezkedett el. Ez már távoltagek mondható, amennyiben a hangfrekvencia nagyobb, mint 218 Hz.

A mérések során a mikrofonokat egymástól egyenlő, 0.1 m távolságra helyeztem el. Ezzel a mikrofon-távolsággal akkor érhető el a legjobb érzékenységi szög, ha a vizsgált frekvenciára:

$$d = \frac{\lambda}{2}, \quad (6.1)$$

teljesül, melyből

$$f = \frac{c}{2d} = 1715 \text{ Hz}, \quad (6.2)$$

ahol d a mikrofonok távolsága, f a hangfrekvencia. Ez azt jelenti, hogy amennyiben a hangfrekvencia 1715 Hz-nél nagyobb, már megfigyelhető a térbeli aliasing jelensége. 1715 Hz-es hangfrekvencia esetén érhető el a legkisebb érzékenységi szög, a frekvencia további csökkenésével az érzékenységi szög nő.

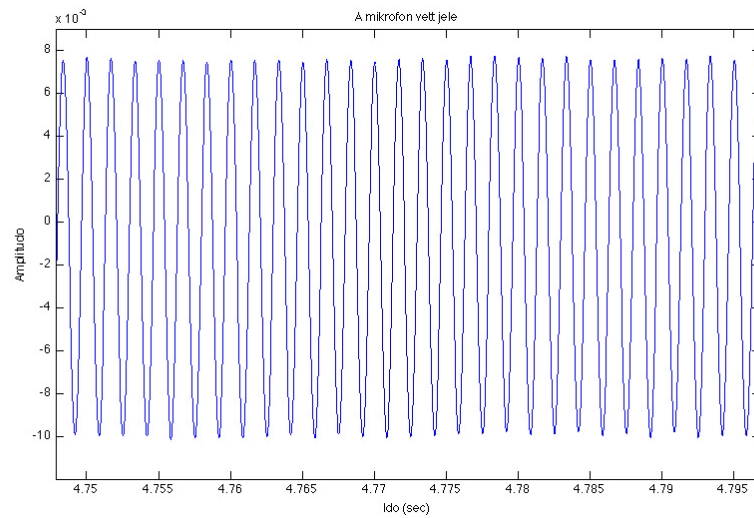
A mérés során a mérőjel sinusjel volt, vagy csak az egyik, vagy mindkét hangszugárzó működtetésével végeztem iránymeghatározást. A mérés során összeállítottam a rendszert, bekapcsoltam a hangszugárzó(ka)t, majd Audacity programmal rögzítettem egy pár másodperces felvétel mind a 8 csatornáról. Ezeket .wav fájlba mentettem, MATLAB-ot használva beolvastam az adatokat, és az ismertetett, végtelen fókusztávolságú nyálábformáláson alapuló módszer segítségével meghatároztam a hangforrás vagy hangforrások vízszintes irányát. A mérések során a hangerősséget általában közepes szintre (40 dB körüli érték) állítottam, mivel túl nagy hangerő nagy reflexiókat okozhat a falakon és tárgyakon, míg túl alacsony hangerő esetén a zajok lesznek túl nagyok.

Az első mérés során az A hangszugárzót működtettem, közepes hangerősséggel, 600 Hz frekvencián, 73° főirányból. Tehát $d=0.1$ m, $N=8$, $f=600$ Hz, $\vartheta_M=73^\circ$. A regisztrált és mentett értékeket MATLAB-ba importáltam, az első mikrofon vett jelének időfüggvénye, annak egy részlete a 6.2 ábrán látható.

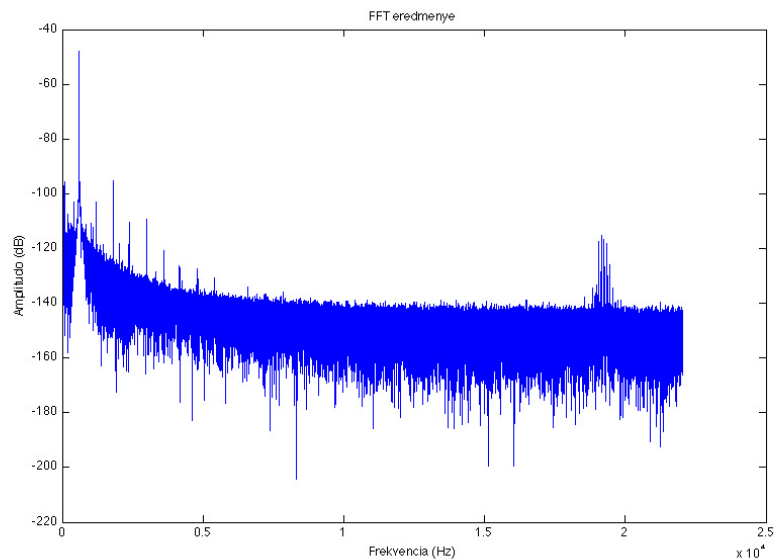
Ezt követően, a megadott kívánt szögfelbontás és a beolvasott jelek alapján a `calcpattern()` függvény lokalizációt végez, mely a 4. fejezetben ismertettek szerint működik. Az első mikrofon vett jelének amplitúdó karakterisztikája a 6.3 ábrán látható.

A 6.3 ábrán a sugárzott hangfrekvencián kiemelkedő csúcs látható, a többi, alacsonyabb csúcsot a zajok okozzák. A kapott iránykarakterisztika polárkoordináta-rendszerben

6. Iránymeghatározás az elkészített rendszer alkalmazásával

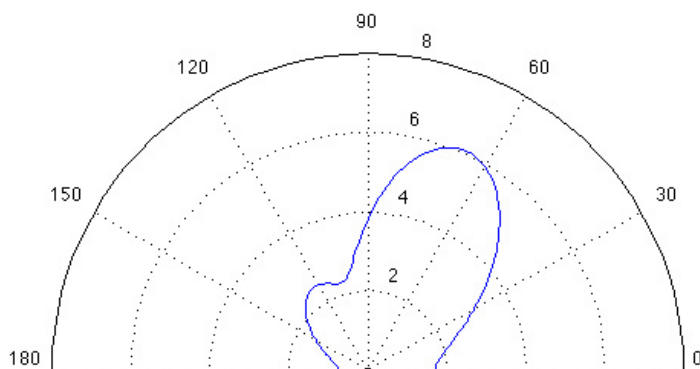


6.2. ábra. Az első mikrofon vett jelének időfüggvénye



6.3. ábra. Amplitúdó karakterisztika számítása a vett jelekre, $f=600$ Hz esetén

a 6.4 ábrán látható. Az eredmények amplitúdója a valós mérések során nem egyezik meg a mikrofonok számával, mivel az egyes frekvenciakomponensek amplitúdója a különböző mikrofonokra nem egyezik meg a zajok, és az elkészített rendszer hibái miatt. A kapott iránykarakteristikákat nem normáltam a mikrofonok számára.

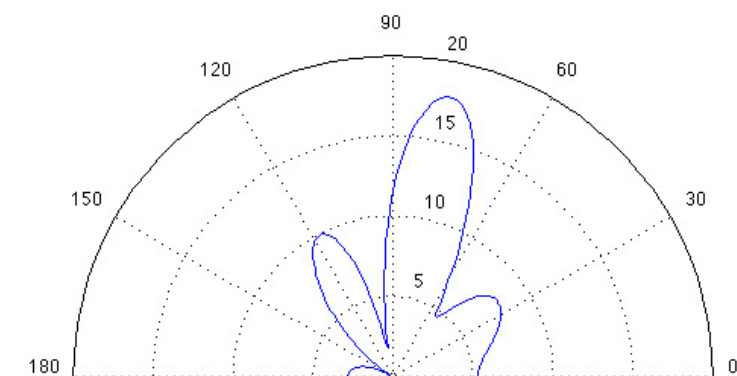


6.4. ábra. A kapott $|F(\vartheta)|$ iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=600$ Hz esetén

A 6.4 ábrán látható, hogy a függvény a maximumhelyét $\vartheta=68^\circ$ -nál veszi fel, tehát az lokalizáció 5° -ot tévedett a valódi irányhoz képest. Az iránymeghatározás eredménye jónak mondható, a kapott hiba a zajoknak, szóródásoknak, a mikrofonok elhelyezésének apró pontatlanságának, valamint a mikrofonok nem teljesen pontos beállításának, irányításának köszönhető. A lokalizáció pontossága ezen kívül függhet a hangerősségtől, valamint a szoba kialakításától. Az ábrán megfigyelhető, hogy mivel az elemtávolság jóval kisebb a hanghullámhossz felénél, ezért gyenge az irányítottság, az érzékenységi szög meglehetősen nagy: 67° . Ezt a mérést a szimuláció eredményeivel összevetve megállapítható, hogy az iránymeghatározás jól működik, az érzékenységi szög kicsit nagyobb, mint a szimuláció esetén. A valós mérés nagyobb érzékenységi szöge és pontatlansága a zajoknak, a mikrofonosor beállítási hibáinak, a kvantálási hibáknak, valamint a hanghullámok egyes tárgyakra és falakra való visszaverődésének köszönhető.

Amennyiben az A jelű hangforrás frekvenciáját 1000 Hz-re állítjuk, a kapott iránykarakterisztika a 6.5 ábrán látható.

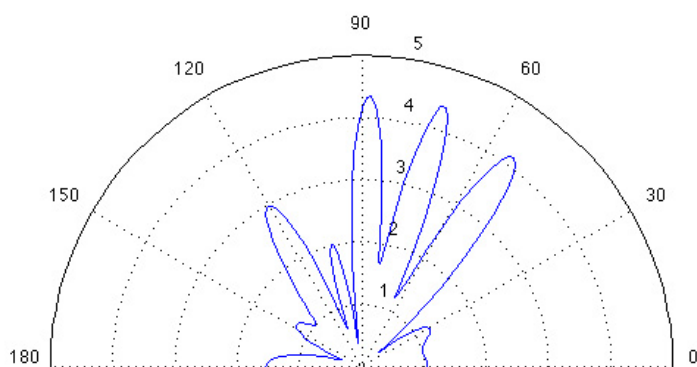
Az iránymeghatározás eredménye: $\vartheta=78^\circ$ -os szöget bezáró irányból érkezett a hang. Ez is 5° tévedést jelent a valódi irányhoz képest, elmondható, hogy ezzel a rendszerrel, ilyen körülmények között, ez jó eredmény. Az érzékenységi szög 31° , kisebb, mint az előző esetben. Ez annak köszönhető, hogy a látható tartomány hossza nőtt, de még mindig nem ismétlődik. Az ábrán megfigyelhető egy nagyobb melléknyaláb, mely a hangvisszaverődéseknek és szóródásoknak köszönhető.



6.5. ábra. Az iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=1000$ Hz esetén

Ha a hangugárzó frekvenciáját nagyobbra választjuk, mint 1715 Hz, a mikrofonok egymástól vett távolsága nagyobb lesz, mint a félhullámhossz fele, és megfigyelhető a térbeli aliasing. Ekkor a lokalizáció már nem végezhető el megfelelően, hiszen hamis főnyalábok is megjelennek a karakterisztikában.

Ennek vizsgálatához az A jelű hangugárzó frekvenciáját 2000 Hz-re állítottam. A változatlan, $d=0.1$ m elemtávolság mellett kapott eredményeket, az iránykarakterisztikát a 6.6 ábra szemlélteti.

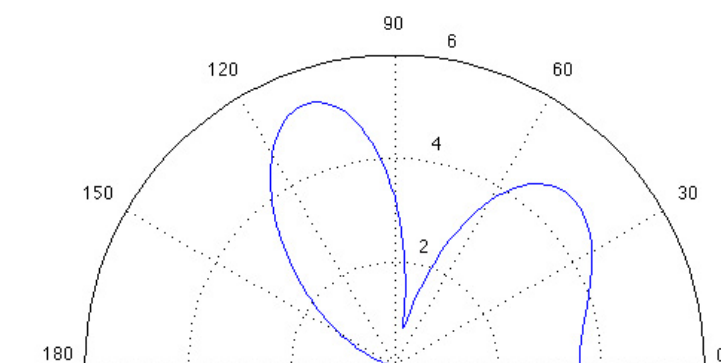


6.6. ábra. A kapott iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=2000$ Hz esetén

Az iránykarakterisztikában megfigyelhető, hogy két hamis főnyaláb is megjelenik a valódi, 72° -os szöget bezáró irányból érkező hanghullám főnyalábja mellett. Ez a térbeli aliasing jelensége. Megfigyelhető továbbá, hogy a frekvencia növelésének köszönhetően a főnyaláb érzékenységi szöge tovább csökkent.

Az A jelű hangugárzót $\vartheta_M=45^\circ$ -os szöget bezáró irányban elhelyezve, 600 Hz-es hang-

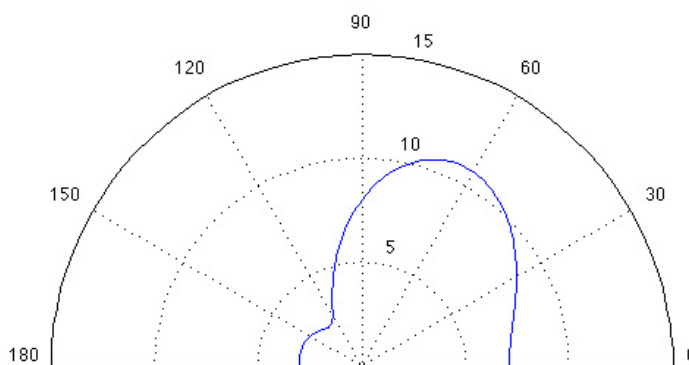
forrás esetén az iránykarakterisztika a 6.7 ábrán látható.



6.7. ábra. A kapott $F|(\vartheta)|$ iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=600$ Hz esetén

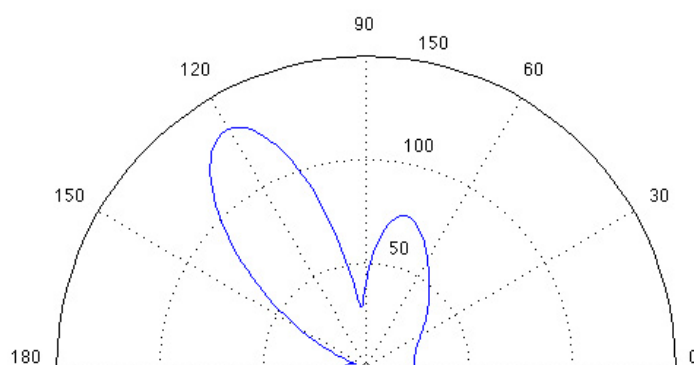
Az eredmények azt mutatják, hogy egy hamis főnyaláb is megjelent az iránykarakterisztikában. A valódi főnyaláb a maximumát $\vartheta=46^\circ$ -os szögnél veszi fel, az érzékenységi szöge meglehetősen nagy, mint az várható. A hamis főnyaláb a hangszugaraknak a laborban egyes tárgyokról, valamint a falról való visszaverődésének köszönhető.

A következő mérés során bekapcsoltam mindkét hangszugárzót. Az A jelű hangszugárzó $\vartheta_M=73^\circ$ -os irányból, 400 Hz-en, míg a B jelű hangforrás $\vartheta_M=117^\circ$ -os irányból, 1000 Hz-en bocsátott ki hangszugárzást, közepes, 40 dB körüli hangerőn. A kapott iránykarakterisztikák a 6.8 és a 6.9 ábrán láthatók.



6.8. ábra. Az iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=400$ Hz esetén

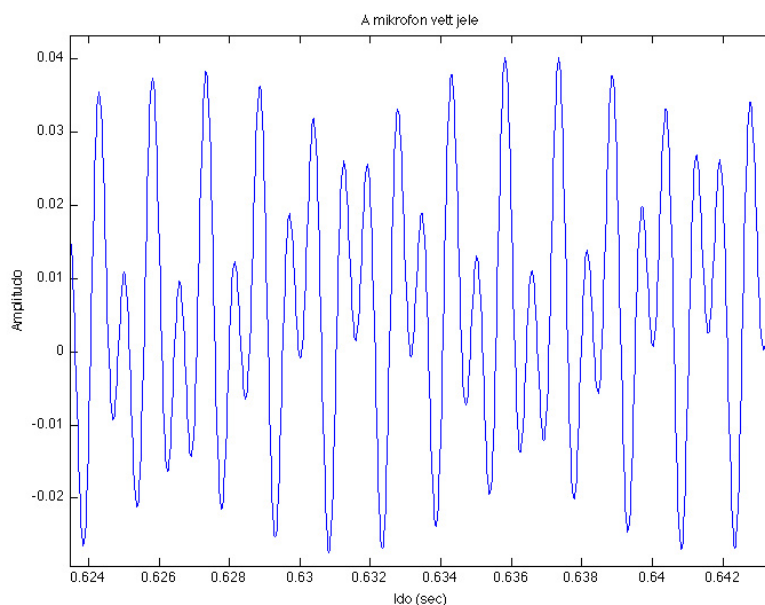
A lokalizációs algoritmus mindkét hangfrekvencián detektált hangszugárzást, és a lokalizáció után az egyes frekvenciákra az ábrákon látható iránykarakterisztikákat rajzolta. Az algoritmus a 400 Hz-es jel esetén 62° -ot, míg az 1000 Hz-es jel esetén 121° -ot adott az iránymeghatározás eredményeként. Ezek 11° -os, illetve 4° -os tévedések, az utóbbi eredmény pontosnak mondható. A 400 Hz-es jelhez számított iránykarakterisztikán a főnyaláb



6.9. ábra. A kapott $|F(\vartheta)|$ iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=1000$ Hz esetén

érzékenységi szöge 107° , ami nagyon gyenge irányítotttságot jelent. Az 1000 Hz-es hangsugárzó esetén a főnyaláb érzékenységi szöge jóval kisebb, 42° . Ezen a karakterisztikán már egy nagyobb melléknyaláb is megfigyelhető.

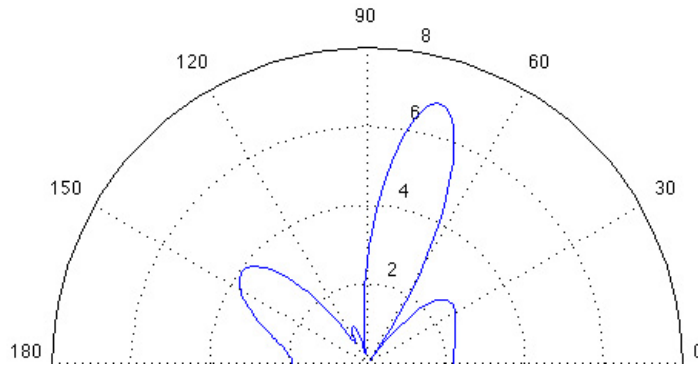
A következő mérés során szintén mindkét hangsugárzó működött. Az *A* jelű hangsugárzó $\vartheta_M=73^\circ$ -os szögből, 1300 Hz-en, míg a *B* jelű hangforrás $\vartheta_M=117^\circ$ -os szögből, 700 Hz-en bocsátott ki hangsugárzást, közepes, 40 dB körüli hangerőn. Az egyik mikrofon vett jelének időfüggvényét a 6.10 ábra mutatja.



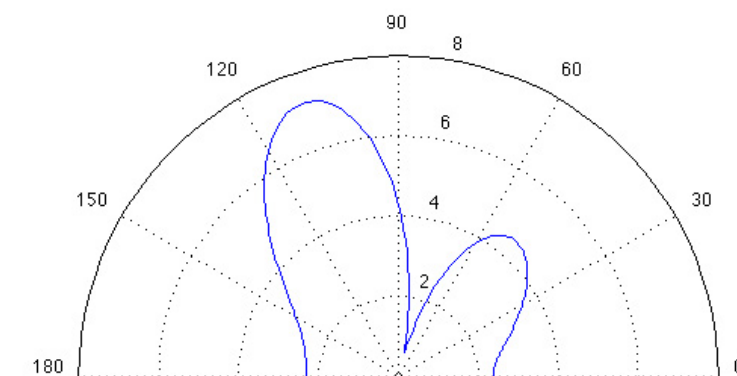
6.10. ábra. Az első mikrofon vett jelének időfüggvénye

A 6.10 ábrán látható a 700, és 1300 Hz frekvenciájú jel, valamint megfigyelhető,

hogy a mérési regisztrátumon alacsony frekvenciás zaj ül. A lokalizáció után a kapott iránykarakterisztikák a 6.11, és a 6.12 ábrán láthatók.



6.11. ábra. Az iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=1300$ Hz esetén



6.12. ábra. A kapott $|F(\vartheta)|$ iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=700$ Hz esetén

Az eredményekből látható, hogy az 1300 Hz-es hangsugárzót az algoritmus a mikrofonok egyenesét $\vartheta=74^\circ$ -os szöget bezáró irányból, míg a 700 Hz-es hangsugárzó jeleit $\vartheta=111^\circ$ -os szögből látja. A mérés során jól működik a lokalizáció, az iránykarakteristikákból látszik, hogy a kisebb frekvencia esetén nagyobb az érzékenységi szög. Az alacsonyabb frekvenciához tartozó iránykarakteristikán egy nagyobb melléknyaláb is látható, mely a visszaverődések miatt van.

6.2. Mérés nagyobb tanteremben

Ezt követően az IE 224 tanteremben állítottam össze a lokalizációs rendszert. Ez egy nagyobb terem, melyben több pad található, melyek nagyobb hangvisszaverődést és szóródást okoznak. A tanteremben egy hangsugárzót helyeztem el a mikrofonosortól különböző

távolságokban és irányokban, a mikrofonsort pedig az ablak mentén, azzal párhuzamosan. A terem, melyben a rendszert összeállítottam, a 6.13 ábrán látható.



6.13. ábra. A mérési elrendezés

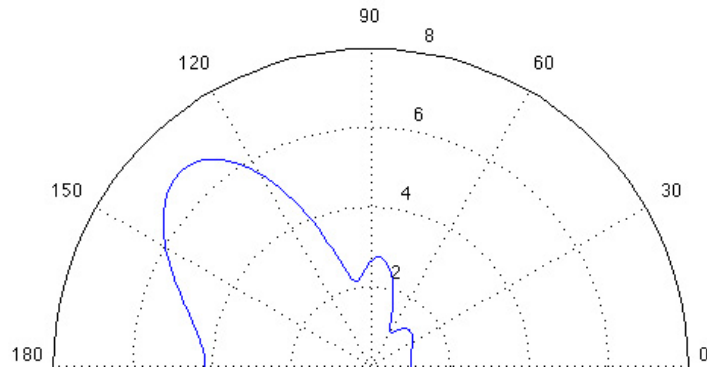
A 6.13 ábrán látható a mikrofonosor az ablak mentén, mellette az mikrofontömb áramkörti egysége, az erősítő, az analóg interfész és a notebook.

A hangsugárzót $\vartheta_M=135^\circ$ -os főirányba helyezve a mikrofonosor távolterében (attól 3.1 m távolságra), 750 Hz-es, közepes (40 dB) hangerősségű sinusjelet sugározva, a mikrofonok változatlan elhelyezése és távolsága (0.1 m) mellett a 6.14 ábrán látható iránykarakterisztikát kaptam.

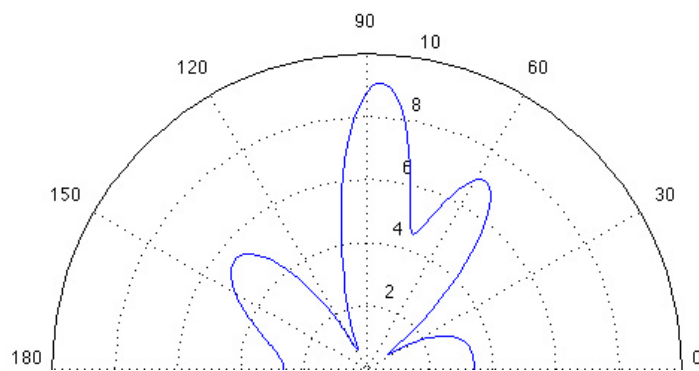
Az iránymeghatározás eredménye $\vartheta=135^\circ$, az eredmény pontos. Az érzékenységi szög 72° , ez a gyenge irányítottság várható az elrendezés és a 750 Hz-es hangfrekvencia, és a nagyobb (135° -os) irányból érkező hang esetén.

A hangsugárzót $\vartheta_M=60^\circ$ -os szögben beállítva, 1190 Hz-es, nagyobb hangerősségű (körülbelül 65 dB) forrás esetén a kapott iránykarakterisztikát a 6.15 ábra mutatja.

A lokalizáció eredménye ebben az esetben $\vartheta=87^\circ$. Az iránykarakterisztikából látható, hogy egy hamis, az eredetinél nagyobb amplitúdójú főnyaláb jelent meg a karakterisztikában. A második legnagyobb főnyaláb $\vartheta=59^\circ$ -os szögben látszik, mely a valódi eredmény. A hamis főnyaláb megjelenését a nagyobb hangerősség, és a tanteremben elhelyezkedő



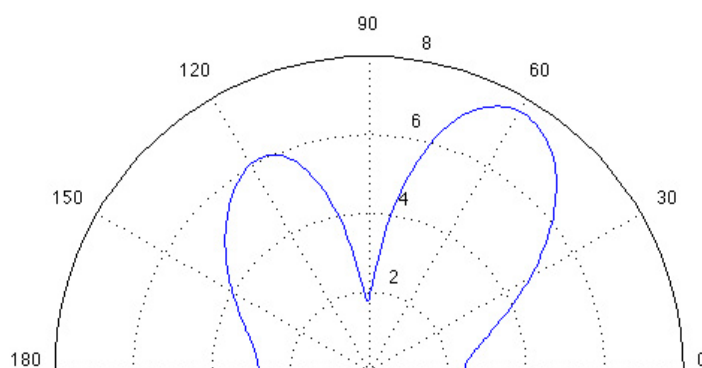
6.14. ábra. A kapott iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=750$ Hz



6.15. ábra. Az $|F(\vartheta)|$ iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=1190$ Hz esetén

tárgyakról és falakról visszaverődő hang okozta. Az érzékenységi szögek kicsik, mivel a hangforrás frekvenciája közelebb van az 1715 Hz-es frekvenciához.

A hangsugárzót $\vartheta_M=60^\circ$ -os szögben elhelyezve, alacsonyabb hangerősséget, 970 Hz-es frekvenciát beállítva a kapott karakterisztikát a 6.16 ábra mutatja.



6.16. ábra. Az iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=970$ Hz esetén

A lokalizáció eredménye $\vartheta=59^\circ$, tehát az iránymeghatározás jól működik. A karakterisztikába megfigyelhető nagyobb oldalnyaláb a visszaverődések miatt van. Az érzékenységi szög 58° .

Összefoglalásként elmondható, hogy az összeállított rendszerrel az iránymeghatározás megfelelően működik. A kapott karakterisztikákból látható, hogy a hangfrekvencia növelésével (vagy a mikrofonok elemtávolságának csökkentésével) az érzékenységi szög csökken, míg a frekvencia $d = \frac{\lambda}{2}$ korláthoz tartozó frekvencia fölé növelésével megjelenik a térbeli aliasing. Az iránymeghatározás pontosságát az elemek száma, elhelyezésének pontossága, a hangsugárzó(k) elhelyezése, a különböző zajok és visszaverődések, valamint a hangerősség befolyásolják. Nagyobb hangerő, illetve nem süketszobában való összeállítás esetén a visszaverődések következtében megjelenhetnek hamis főnyalábok, vagy nagyobb oldalnyalábok.

Az eredmények a mikrofonok számának további növelésével, nagyobb pontosságú mikrofonok alkalmazásával tovább javíthatók. Amennyiben függőlegesen is elhelyezzük a mikrofonosort, függőleges szöget bezáró irányban is végezhető iránymeghatározás, mely segítségével kétdimenziós akusztikai kép készíthető. A mérés menete ekkor további megfontolásokat igényel, mivel a függőleges elhelyezésnek nagyon pontosnak kell lennie; a mikrofonosorok tengelyének középpontja egybe kell, hogy essen mindkét elrendezés esetén. A függőleges irány pontos beállítása ekkor szintén fontos.

Az eredményekből látható, hogy 8 mikrofon alkalmazása mindenképpen szükséges a vízszintes irányban való szögmeghatározáshoz, számuk csökkentésével tovább nő az érzékenységi szög, és a lokalizáció pontatlansága. A visszaverődések és zajok is legalább 8 mikrofon alkalmazását indokolják.

A mérési eredményeket és a szimuláció eredményeit összevetve megállapítható, hogy míg a szimuláció eredményei maximális pontossággal bírnak, addig a valós eredmények pontatlansága nagyobb. Ez a valós összeállításban fellelhető apróbb elhelyezési hibáknak, mérési és kvantálási hibáknak, zajoknak és a visszaverődéseknek köszönhető. A valós eredmények ugyanakkor jól összevethetők a szimuláció eredményeivel, az eredmények mindkét esetben megfelelőek, és ugyanazok a következmények vonhatók le belőlük. A legnagyobb hibákat a falakról és tárgyakról való hangvisszaverődések okozzák, melyek következtében hamis főnyalábok, és nagy melléknyalábok jelennek meg a karakterisztikákban.

7. fejezet

Gyakorlati alkalmazások

Az ebben a fejezetben bemutatott gyakorlati alkalmazásokkal lehetőség van a különböző hangforrások lokalizálására, az eredmények analizálására, melyek segítségével zajcsökkentés, illetve minőség-ellenőrzés valósítható meg.

7.1. Hangforrások lokalizálása az autóiparban

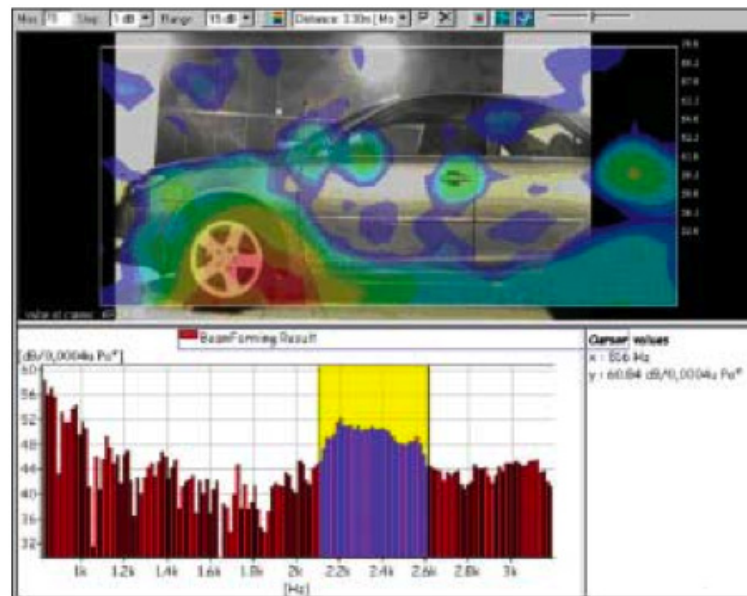
Az akusztikai kamerák egyik fő alkalmazási területe az autóipar. Az itt alkalmazott rendszerek alkalmasak bonyolult jelfeldolgozási feladatokra. A vásárolt rendszerekhez kapott szoftverek segítségével lehetőség van két-, és háromdimenziós akusztikai képalkotásra, valamint idő-, és frekvenciatartománybeli jelanalízisre. Ezek az eszközök részletes és nagy felbontású vizsgálatokat tesznek lehetővé, segítségükkel külön-külön vizsgálhatók a különböző forrásokból származó hangok, széles frekvenciatartományban.

7.1.1. Jármű a szélcsatornában

Az egyik alkalmazási példa a járművek szélcsatornában való vizsgálata. Egy ilyen rendszerrel való vizsgálattal készült akusztikai kép, és a hozzá tartozó panel a 7.1 ábrán látható.

A 7.1 ábra alsó részén lévő panelen a vizsgált térrész spektrumábrája látható, mely azt mutatja, hogy egyes hangfrekvenciákon a mikrofontömb mekkora jelszinteket mért. Kiválasztható a vizsgálni kívánt frekvenciatartomány, ekkor erre a tartományra korlátozódik az ábra felső részén látható akusztikai kép. Ebben az alkalmazási példában az autót a szélcsatornában, széllal szemben helyezték el, a szél sebessége 130 km/h volt.

Ahhoz, hogy a mikrofontömböt a szélcsatornán kívül helyezhessék el, a forrástól va-



7.1. ábra. Egy szélcsatornába helyezett járműről készített akusztikai kép [3]

ló nagyobb távolság – a példában 3.3 méter – szükséges. Ekkor a legjobb megoldás a nyalábformálás alkalmazása, mivel a közeltéri akusztikus holográfiával nagyon nagy méretű mikrofontömbre lenne szükség ilyen távolságból, továbbá a NAH-hal ekkora mérési távolságról már nem lehet jó frekvencia-felbontást biztosítani. Ahhoz, hogy NAH segítségével ezt a mérést hatékonyan meg lehessen valósítani, körülményesebb mérésre lenne szükség, mivel a mikrofontömböt a szélcsatornán belül kellene elhelyezni. Az itt alkalmazott mikrofontömb 90 csatornás kerék elrendezésű volt, melynek síkja az áramlási zónán kívül helyezkedett el. Az ábrán kiválasztott frekvenciatartomány 2.1 kHz és 2.6 kHz között volt, az akusztikai kép ezt a tartományt mutatja.

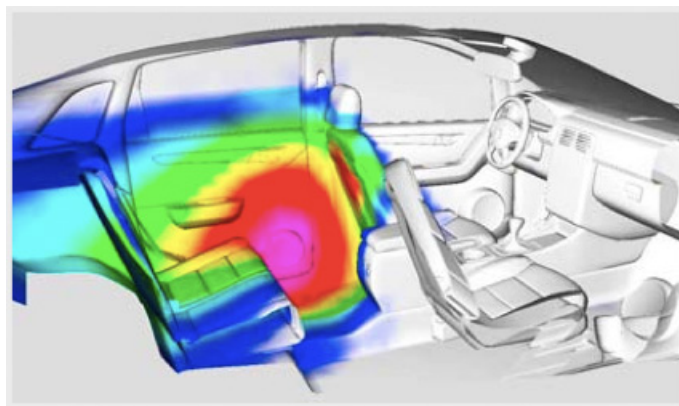
7.1.2. Utastérbe helyezett akusztikai kamera

Az utastérbe helyezett akusztikai kamerákkal főleg a kívülről beszűrődő zajokat, az ajtók megfelelő szigetelését vizsgálják, valamint azt, hogy a motorzaj mennyire hallatszik be az utastérbe. Egy ilyen rendszer, és az általa készített akusztikai kép a 7.2 és a 7.3 ábrákon látható.

A méréshez 48 elemű, 35 cm átmérőjű, gömb elrendezésű mikrofontömböt használtak, beépített kábelezéssel és videokamerával. Az ábra a hátsó ajtó alsó részének nem megfelelő hangszigetelését mutatja.



7.2. ábra. Utastérbe helyezett akusztikai kamerarendszer [10]



7.3. ábra. Utastérbe helyezett akusztikai kamerával alkotott kép [10]

7.1.3. Motorhang vizsgálata

A legtöbb vásárló számára fontos szempont a motor karakterisztikus hangja, ezért a gyártók részletesen megvizsgálják az autómotor által kibocsátott hangokat. Ilyenkor aprólékos, minden részletre kiterjedő méréseket végeznek nyitott motorháztetőnél, a mikrofontömb motor fölé való elhelyezésével. A méréseket nagy frekvenciatartományban, több fordulatszámon végzik, különösen figyelve a kattogó, zörgő, füttyülő, sípoló hangokra, melyek az utasokat leginkább zavarják. Egy ilyen, lokalizációs rendszerrel készített akusztikai kép a 7.4 ábrán látható.



7.4. ábra. Autómotorról készített akusztikai kép [3]

A mérést 66 elemű, kerék elrendezésű, 1 méter átmérőjű mikrofontömbbel végezték, melyet a motortól 0.9 m-re helyeztek el. A kép készítésekor a motor 3500 RPM-es fordulatszámon működött, az ábrán a 6-6.6 kHz-es frekvenciatartomány akusztikai képe látható.

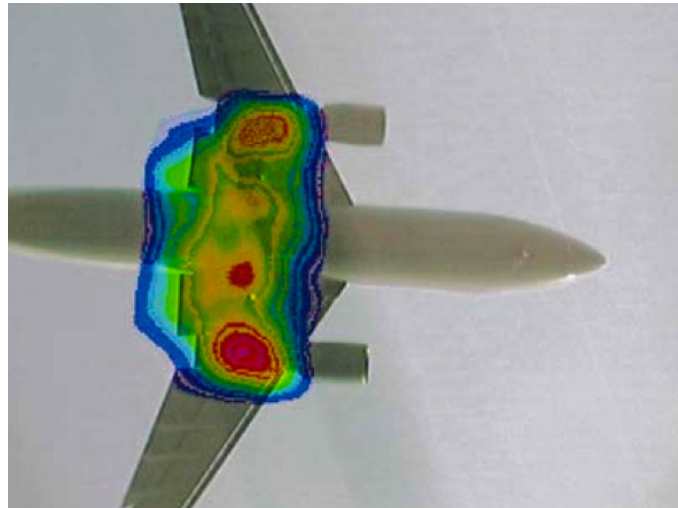
7.2. Zajforrások vizsgálata

Az üzemi gépek, berendezések gyártásakor, járművek tervezésekor alapvető szempont a minél alacsonyabb zajkibocsátás. A zajártalmak a mai életvitel minden területén jelen vannak, a hangos ipari berendezések, háztartási eszközök, járművek napjaink egyik jellemző zavaró tényezői, melyek fizikai problémákat is okozhatnak.

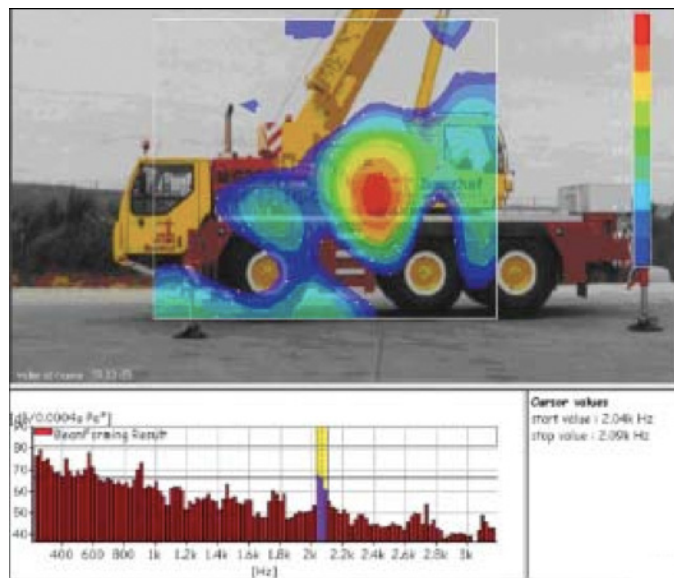
A zajkibocsátások vizsgálatához, ezzel a zajcsökkentés tervezésének segítségével hozzájárulnak az akusztikai kamerarendszerek. Ezek alkalmazása nagy kiterjedésű, távoli, vagy mozgó zajforrások esetén – legtöbbször a végtelen fókusz távolságú nyalábformálás

módszerét alkalmazva – sok előnnyel jár, mivel a vizsgált felületekre sokszor nem szerelhetők közvetlenül mikrofonok a túl magas hőmérséklet, túl nagy kiterjedés, vagy az eszköz nagy sebességgel történő mozgása miatt.

Ilyen alkalmazásra példaként említhető egy mérési pont felett elszálló repülőgép zajkibocsátásának vizsgálata, vagy egy darus kocsiról készített akusztikai kép, melyeket a 7.5 és a 7.6 ábrák mutatnak.



7.5. ábra. Repülőgép motorjáról több száz méter távolságból készített akusztikai kép [10]



7.6. ábra. Darus kocsiról készült akusztikai kép [3]

A repülőgép vizsgálatához 48 elemű, csillag alakú, 3.4 méter átmérőjű, 3-300 méter hatótávolságú mikrofontömböt használtak, míg a darus kocsiról készített képhez 42

csatornás, 1 méter átmérőjű, kerék elrendezésű mikrofontömböt alkalmaztak. A darus kocsiról készített ábra 2.05-2.1 kHz-es frekvenciatartományban mutatja a kocsi által kibocsátott zajokat.

Egy további zajforrás-meghatározási alkalmazásra példa egy üzemi komplexumról készített akusztikai kép 300 méter távolságból, mely a 7.7 ábrán látható.



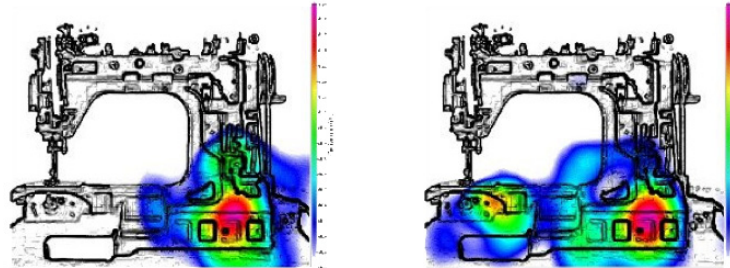
7.7. ábra. Üzemi komplexum akusztikai képe, 300 méter távolságból [6]

A példából látható, hogy akusztikai kamerákkal viszonylag gyorsan, széles frekvenciatartományban, jó felbontással vizsgálhatók olyan térrészek és felületek, melyek más megoldásokkal – például mikrofonok sugárzó felületre való rászerezésével – egyáltalán nem megoldhatók.

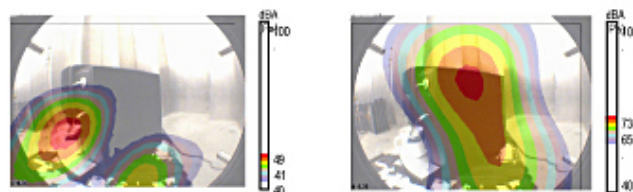
7.3. Minőség-ellenőrzés, minőségbiztosítás

Az akusztikai kamerák minőség-ellenőrzésre is használhatók. Sokszor a hibák az egyes termékek különböző hangkibocsátásából is detektálhatók, melyeket a tapasztalt minőség-ellenőrző szakemberek hallás alapján is kiszűrhetnek. Egyes hibák ennek alapján akusztikai kamerákkal is detektálhatók. Ekkor a termékek akusztikai képét összehasonlítják a megfelelően működő termék akusztikai képével, és vizsgálják az eltéréseket, melynek alapján megállapítható, hogy mely alkatrészek hibásak.

Ilyen alkalmazásra példa egy varrógépről, vagy egy kávégépről készült akusztikai kép, melyek a 7.8, és a 7.9 ábrán láthatók.



7.8. *ábra.* Megfelelően működő (bal oldali ábra), és hibás alkatrészrel rendelkező (jobb oldali ábra) varrógépről készült akusztikai kép [10]



7.9. *ábra.* Kávégép akusztikai képe a kávékészítés különböző fázisaiban [11]

8. fejezet

Kereskedelemben kapható akusztika kamera rendszerek

A kereskedelmi forgalomban vásárolható akusztikai kamera rendszerek legtöbbször komplett rendszerek, amelyek tartalmazzák a mikrofontömböket a vázzal és beépített kábelezéssel, a többsatornás adatgyűjtő egységet, és az adatok feldolgozására és megjelenítésére alkalmas szoftvereket. A gyártók pontosan specifikálják a rendszerek paramétereit és alkalmazásának megfelelő körülményeit, megadják a mikrofonok specifikációit, a velük vizsgálható frekvenciatartományt, a javasolt mérési távolságokat, az elérhető felbontást és dinamikatartományt, és a mikrofontömb fizikai méreteit. Ezen kívül leírás található arról is, hogy milyen típusú mérésekhez (kültéri vagy beltéri, illetve a hangforrások mérete) ajánlják az akusztikai kamerát, és megadják a mérhető maximális és minimális hangnyomásszint nagyságát. Sokszor beépített videokamera is található a mikrofontömbben, mellyel képi felvételek készíthetők, így az akusztikai kép ábrázolható a mért felület képére.

8.1. Adatgyűjtő egység és adatfeldolgozó szoftver

A mikrofonok jeleinek fogadásához szükséges sokcsatornás adatgyűjtő egység a jelek kondicionálást, digitalizálását, valamint a feldolgozó egység felé történő továbbítását végzi. Sok gyártó kínál ilyet a mikrofontömbökhöz. Ezek az egységek szabványos interfészekkel rendelkeznek a PC felé, és nagy sebességgel továbbítják a mikrofonok jeleit. Az átviteli sebesség nagy mértékben függ az alkalmazott mintavételi frekvenciától, és a használt csatornák számától. Léteznek merevlemezzel rendelkező adatgyűjtő egységek is, melyekre rögzíthetők a mikrofonok vett jelei. A GFaI cég [10] modulokból felépíthető

adatgyűjtő egysége a 8.1 ábrán látható.



8.1. ábra. GFAI mcdRec 721 adatgyűjtő egység [10]

Az adatgyűjtő kártyánként 24 mikrofon (maximum 144 csatorna) jeleinek fogadására, kondicionálására, AD átalakítására és továbbítására képes, 48-192 kHz csatornánkénti mintavételi frekvenciával. Az egység működését, az adatok továbbítását beágyazott operációs rendszer végzi, az adatgyűjtő Ethernet hálózati interfésszel rendelkezik.

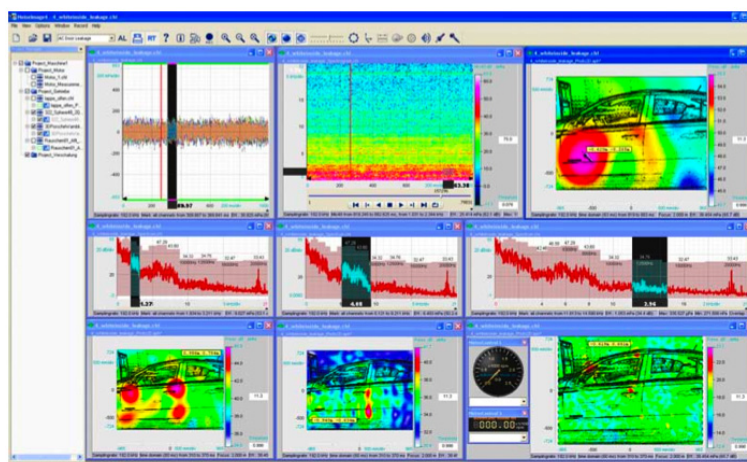
Az adatgyűjtő egység által továbbított jelek feldolgozását és az adatok megjelenítését általában PC-n futtatható, a gyártók által a rendszerrel együtt megvásárolható, külön ezekhez a rendszerekhez tervezett szoftver végzi. Az adatok megjelenítéséhez sokféle beállítási lehetőség kínálkozik, a 2, vagy 3 dimenziós akusztikai kép mellett sokszor lehetőség van akusztikai videó megjelenítésére, idő-, és frekvenciatartománybeli részletes analízisre, a megjelenített térrész egyes területeinek külön-külön való vizsgálatára, részletes elemzésére. A szoftver a sugárzó felületről készített akusztikai képet automatikusan ráillesztheti a videokamera által készített képfelvételre, az akusztikai videóval pedig elemezhető a vizsgált felület hangsugárzásának időbeli változása.

A 8.2 ábrán látható szoftveres kezelői felületen lehetőség van idő-, és frekvenciatartománybeli, valamint különböző térbeli tartományok egyidejű vizsgálatára, egyszerre több akusztikai kép megjelenítésre.

8.2. Mikrofontömbök

A leggyakrabban alkalmazott mikrofontömb kialakítások a spirál, az optimalizált véletlenszerű, valamint a kerék elrendezés, mivel ezekkel széles frekvenciatartományban jó oldalnyaláb-elnyomás érhető el.

A kerék elrendezést a Brüel & Kjaer cég mérnökei fejlesztették, melynek nagy előnye, hogy széles frekvenciatartományban is jó melléknyaláb-elnyomásra képes. A 8.3



8.2. ábra. A GFaI cég NoiseImage szoftverének kezelői felülete, mely alkalmas egyidejűleg többféle elemzés megjelenítésére [10]

ábrán egy ilyen, 90 csatornás kerék-elrendezésű mikrofonSOR megvalósítás látható, ahol a kábelezés beépített, a fémgyűrűkben fut.



8.3. ábra. A Brüel & Kjaer cég által fejlesztett 90 csatornás, kerék elrendezésű mikrofontömb megvalósítása [3]

A 8.4 ábrán látható a GFaI cég spirál elrendezésű megvalósítása látható.

A mikrofontömböt úgy tervezték, hogy kis mértékű nagyfrekvenciás átlapolódás mellett, nagy alacsony frekvenciás dinamikatartománnyal rendelkezzen, nagy térbeli felbontás mellett. Segítségével 100 Hz-20 kHz-es frekvenciatartomány vizsgálható, 22 dB-es dinamikatartománnyal. Az ideális mérési távolság választható, mivel a vevő által használni kívánt mérési távolsághoz tervezik a kialakítást, kültéri és belső mérésekhez egyaránt ajánlják.

Az eddigi elrendezéseken kívül sokszor használják még a gömb kialakítású mikrofontöm-



8.4. ábra. A GFaI cég 120 csatornás, spirál elrendezésű mikrofontömbje [10]

böt, amelyet belső terekben történő mérésekhez használnak, például autók utasterében akusztikai kép készítéséhez. A gömb kialakításnak köszönhetően az egész belső térről készíthető ilyen kép. A GFaI cég 48 mikrofont tartalmazó mikrofontömbjét a 8.5 ábra szemlélteti.

A cég kínálatában háromféle méretben kapható a gömb elrendezésű mikrofontömb: 32, 48, illetve 120 elem, melyek közt a főbb különbségek az elérhető térbeli felbontásban, maximális mérési távolságban, és a vizsgálható frekvenciatartományban vannak. A megvalósítás érdekessége, hogy a maximális akusztikai áteresztőképesség miatt az állvány karbonszálas anyagból készült.

Mind a spirál, mind a gömb elrendezésű mikrofontömb tartalmaz videokamerát is, mellyel fotó vagy videofelvétel készíthető a vizsgált térrésről.

Nagyobb mérési távolságokra a GFaI cég speciális, csillag alakú elrendezést kínál. Ezt 3-300 méter mérési távolságok esetén használják. A mikrofontömb a 8.6 ábrán látható.

Előnye a kis mértékű nagyfrekvenciás átlapolódás, és a könnyű kezelhetőség (összehajtható). Kifejezetten alacsony frekvenciás mérésekhez és nagy távolságokhoz ajánlják, egy ág hossza 2 m.



8.5. ábra. A GFaI cég 48 elemű, gömb kialakítású mikrofontömbje [10]



8.6. ábra. Csillag elrendezésű, 36 elemű mikrofontömb, beépített videokamerával és kábelezéssel [10]

9. fejezet

Összefoglalás

Munkám során bemutattam az akusztikai iránymeghatározó algoritmusokat. Ezek közül részletesen vizsgáltam két nyalábformálási eljárást, a véges és végtelen fókusz távolságú beamformingot, bemutatva azok részletes működését.

Feladatom közepes méretű szobában való akusztikai iránymeghatározás megvalósítása volt, melyhez a végtelen fókusz távolságú nyalábformálás MATLAB-os implementálását választottam. Ez az algoritmus illeszkedik legjobban a feladatomhoz, mivel kevés (8 darab) mikrofon alkalmazásával van szükség lokalizációra úgy, hogy feltételezhető, hogy a hangforrás a mikrofon sor távolterében helyezkedik el, és nem tudjuk pontosan a forrás és a mikrofontömb távolságát. Az algoritmust megvalósítottam MATLAB programnyelvben, majd egy szimulációs környezetet kialakítva teszteltem és elemeztem annak működését.

Ezt követően egy másik hallgatóval együtt megépítettünk, már létező elemek felhasználásával egy valós mikrofontömböt. A mikrofontömb megfelelő működését megvizsgáltam, majd javaslatot téve a mikrofonok elrendezésére, a megépített rendszerrel valós környezetben végeztem iránymeghatározást. A mérési eredmények elemzésével megállapítható, hogy a lokalizáció sikeresen működik, az eredményeket összevettem a szimuláció eredményeivel.

A különböző lokalizációs algoritmusokról elmondható, hogy mindegyiknek megvan a maga korlátai, működésük ideális körülményei. Napjainkban rengeteg alkalmazásban használnak akusztikai iránymeghatározást, érdemes mindig a feladathoz legjobban illeszkedő módszert használni. A gyakorlati alkalmazásokat elemezve látható, hogy az iparban napjainkban kivétel nélkül irreguláris elrendezésű mikrofontömböket használnak, melynek oka, hogy ezek az elrendezések minden szempontból előnyösebb tulajdonságokkal rendelkeznek, mint a hagyományosak.

Munkám sokféle irányban folytatható, továbbfejleszhető. Lehetőség lenne egy olyan, irreguláris elrendezésű mikrofontömb kialakítására, mellyel a már alkalmazott végtelen fókusz távolságú nyalábformálás elvét használva pontosabb, síkbeli iránymeghatározás végezhető. Ehhez több mikrofonra lenne szükség, és stabilabb elrendezésre. Az összeállított, sok mikrofont tartalmazó mikrofontömbbel akár a véges fókusz távolságú nyalábformálást megvalósítva is végezhető lenne iránymeghatározás, a két algoritmus eredményeinek összevetésével és elemzésével. Egy ilyen rendszer összeállításával kiterjeszhetnénk a vizsgálható frekvenciatartományt, és a rendszer a hangforrások pontosabb lokalizálását tenné lehetővé.

Ezen kívül lehetőség van többféle iránymeghatározó algoritmus megvalósítására és alkalmazására, valamint a kifejlesztett algoritmus, programok optimalizálására, egy keretrendszer kialakítására, mellyel egy kész rendszert kaphatunk.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani konzulensemnek, Balogh Lászlónak a sok értékes segítségért és hozzászólásért, valamint Horváth Gergelynek a mikrofontömb megépítésében való közös munkáért.

Irodalomjegyzék

- [1] Nagy Lajos, *Antennák és hullámterjedés*. BME jegyzet.
- [2] Robert P. Dougherty, *What is beamforming?* Berlin Beamforming Conference, 2008.
- [3] J. J. Christensen - J. Hald, *Beamforming*. Brüel & Kjaer Technical Review, 2004.
- [4] J. Hald, *Combined NAH and Beamforming using the same array*. Brüel & Kjaer Technical review, 2005.
- [5] Ulf Michel, *History of acoustic beamforming*. Berlin Beamforming Conference, 2006.
- [6] Balázs Péter, *Hangforrás lokalizálása mikrofontömbbel*. Diplomaterv, BME, 2008.
- [7] Jeroen Lanslots, Filip Deblauwe, Karl Janssens, *Selecting sound source localization techniques for industrial applications*. Belgium, 2010.
- [8] Brian D. Jeffs, *Beamforming*. Brigham Young University, 2004.
- [9] Teréki Csaba, *Fázisvezérelt antennarácsok*. 2006.
- [10] *Acoustic Camera*. GFaI Tech Gmbh, 2011.
URL: <http://acoustic-camera.de>

[11] *Sound Source Localization*. LMS International, 2011.

URL: <http://www.lmsintl.com/sound-source-localization>

[12] Arie van Rhijn, *Integrated Circuits for High Performance Electret Microphones*. Audio Engineering Society, 2003.

[13] *Elektret mikrofon áramkör*, 2011.

URL: http://www.epanorama.net/circuits/microphone_powering.html

Ábrák jegyzéke

1.1.	A NAH és a nyalábformálás felbontásának összehasonlítása [4]	5
2.1.	A mikrofonosor elrendezése	7
2.2.	Egyszerű antennasor elrendezése	10
2.3.	$ F(\Psi) $ függvény (felső ábra), és az ebből számított $F(\vartheta)$ függvény (alsó ábra, polárdiagramon ábrázolva) [1]	13
2.4.	Közeltérbe való fókuszálás esetén a gömbhullámok kiindulópontjának tekinthető fókuszpont és a mikrofonok elhelyezkedése [3]	15
2.5.	Az adó-, és vevőpontok, valamint helyvektoraik szemléltetése [6]	16
2.6.	A mikrofonok egy egyenes mentén való elhelyezése esetén több pontra fókuszálunk egyszerre	18
3.1.	A beamforminggal és a közeltéri akusztikus holográfiával elérhető felbontás összehasonlítása [4]	22
3.2.	A melléknyalábok alakulása egyenletes, vonalmenti elrendezés esetén [3]	23
3.3.	Lehetséges hagyományos és szabálytalan mikrofontömb kialakítások [3]	24
3.4.	Maximális oldalnyaláb szint (MSL) a frekvencia függvényében, különböző elrendezések esetén, a következő jelölésekkel: X-array: kereszt, Grid: rács, Random: véletlenszerű, Optimised Random: optimalizált véletlenszerű, Archimedean: spirál, Wheel: kerék, Half Wheel: félkerék elrendezés [3]	25
3.5.	Különböző elrendezések esetén látható akusztikai képek [3]	25
4.1.	Egy mikrofon vett jelének időfüggvénye	30
4.2.	Amplitúdó karakterisztika számítása a vett jelekre, 2 hangforrás esetén	31
4.3.	A kapott $ F(\vartheta) $ iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=650$ Hz esetén	32
4.4.	Az iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.2$ m, $f=650$ Hz esetén	32
4.5.	A kapott iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.34$ m, $f=650$ Hz esetén	33

4.6.	A kapott iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.8$ m, $f=650$ Hz esetén	33
4.7.	Az iránykarakterisztika 169° -os főirányból, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=650$ Hz esetén	34
4.8.	Az iránykarakterisztika 169° -os főirányból, $N=8$, $d=0.27$ m, $f=650$ Hz esetén	34
4.9.	A készített akusztikai kép kereszt elrendezésű mikrofontömb esetén, $N=16$, $d=0.2$ m, $f=650$ Hz esetén	36
4.10.	A hangforrás akusztikai képe, $N=16$, $d=0.5$ m, $f=650$ Hz esetén	36
4.11.	A készített akusztikai kép kereszt elrendezésű mikrofontömb esetén, $N=8$, $d=0.2$ m, $f=650$ Hz	37
4.12.	A hangforrás akusztikai képe, véletlen elhelyezésű mikrofonok esetén, $N=16$, $f=650$ Hz	38
5.1.	Egy elektret mikrofont tartalmazó áramkör kapcsolási rajza	40
5.2.	Egy elektret mikrofont tartalmazó áramkör prototípusa	40
5.3.	Az elkészített mikrofontömb a mikrofonokkal	41
5.4.	Elektret mikrofonok	42
5.5.	A mikrofontömböt, erősítőt, és 10 csatornás USB audio interfészt tartal- mazó rendszer	43
6.1.	A mérési elrendezés	45
6.2.	Az első mikrofon vett jelének időfüggvénye	47
6.3.	Amplitúdó karakterisztika számítása a vett jelekre, $f=600$ Hz esetén	47
6.4.	A kapott $ F(\vartheta) $ iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=600$ Hz esetén	48
6.5.	Az iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=1000$ Hz esetén	49
6.6.	A kapott iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=2000$ Hz esetén	49
6.7.	A kapott $F (\vartheta) $ iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=600$ Hz esetén	50
6.8.	Az iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=400$ Hz esetén	50
6.9.	A kapott $ F(\vartheta) $ iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=1000$ Hz esetén	51
6.10.	Az első mikrofon vett jelének időfüggvénye	51
6.11.	Az iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=1300$ Hz esetén	52
6.12.	A kapott $ F(\vartheta) $ iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=700$ Hz esetén	52
6.13.	A mérési elrendezés	53
6.14.	A kapott iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=750$ Hz	54
6.15.	Az $ F(\vartheta) $ iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=1190$ Hz esetén	54
6.16.	Az iránykarakterisztika, $N=8$, $d=0.1$ m, $f=970$ Hz esetén	55

7.1.	Egy szélcsatornába helyezett járműről készített akusztikai kép [3]	58
7.2.	Utastérbe helyezett akusztikai kamerarendszer [10]	59
7.3.	Utastérbe helyezett akusztikai kamerával alkotott kép [10]	59
7.4.	Autómotorról készített akusztikai kép [3]	60
7.5.	Repülőgép motorjáról több száz méter távolságból készített akusztikai kép [10]	61
7.6.	Darus kocsiról készült akusztikai kép [3]	61
7.7.	Üzemi komplexum akusztikai képe, 300 méter távolságból [6]	62
7.8.	Megfelelően működő (bal oldali ábra), és hibás alkatrészsel rendelkező (jobb oldali ábra) varrógépről készült akusztikai kép [10]	63
7.9.	Kávégép akusztikai képe a kávékészítés különböző fázisaiban [11]	63
8.1.	GFAI mcdRec 721 adatgyűjtő egység [10]	65
8.2.	A GFaI cég NoiseImage szoftverének kezelői felülete, mely alkalmas egyidejűleg többféle elemzés megjelenítésére [10]	66
8.3.	A Brüel & Kjaer cég által fejlesztett 90 csatornás, kerék elrendezésű mik- rofontömb megvalósítása [3]	66
8.4.	A GFaI cég 120 csatornás, spirál elrendezésű mikrofontömbje [10]	67
8.5.	A GFaI cég 48 elemű, gömb kialakítású mikrofontömbje [10]	68
8.6.	Csillag elrendezésű, 36 elemű mikrofontömb, beépített videokamerával és kábelezéssel [10]	68

Függelék

F.1. Script.m fájl

```
clear all;
clc;
close all hidden;

%hangsebesség
sound_speed=343 % (m/sec)

%diszkret ido
M=8000; %ennyi mintabol all vett mikrofon jel
fs=44100; %Hz %kell ennyi, hogy 20 khz-es jelre is betartsuk a mintaveteli tetelt
t=[0:M-1]/fs;

%mikrofonok kozti tavolsag
d=0.2;
%mikrofonsor parameteri
pos_mics=zeros(8,3);
for i=1:8

    pos_mics(i,1)=3*rand();
    pos_mics(i,1)=d*(i-1);
end

%hangszorok parameteri
frequency_of_speakers=[650 ];
pos_of_speakers=[1900 4000 0];
amplitude_of_speakers=[5];

%tablazat szamitasa az egyes mikrofonok helyen
table=calctable(frequency_of_speakers,amplitude_of_speakers,pos_of_speakers,pos_mics,sound_speed,t);

%abrazolas
number_of_mics=size(pos_mics,1);
figure();
```

```

for i=1:1

    subplot(1,1,i);

    plot(t,real(table(:,i)));

    title('A mikrofon vett jele');
    xlabel('t (sec)');
    ylabel('amplitudo');

end

% iranykarakterisztika szamitasa
angle_resolution=0.1;
angle=[0:angle_resolution:180]; %fokban
pattern=calcpattern(pos_mics,table,angle,sound_speed,fs);

%eredeti iranykarakterisztika meghatarozasa, a szimulaciobol!
realpattern=calcrealpattern(pos_mics,pos_of_speakers);
realpattern=ceil(realpattern);

% iranykarakterisztika abrazolasa

figure()

for i=1:size(pattern,1)

    subplot(size(pattern,1),1,i)

    plot(angle,pattern(i,:));
    title('Iránykarakterisztika');
    xlabel('Szög [fok]');
    ylabel('Amplitudo');

end

realpattern

%polardiagram
polarfig(angle,pattern);

%erzekenysegi szög szamitasa
erzekenyseg_szoge=erzekenyseg(angle,pattern,angle_resolution)

%lathato tartomány hosszának szamitasa
for i=1:length(frequency_of_speakers)

    lathato_hossza(i)=2*d*2*pi*frequency_of_speakers(1,i)/sound_speed;
    [max_value max_place]=max(pattern(i,:));

end

lathato_hossza

```

F.2. Calctable.m fájl

```
function [table]=calctable(frequency_of_speakers,amplitude_of_speakers,...
pos_of_speakers,pos_mics,sound_speed,t)
%generates simulation table

x=size(pos_mics,1);
y=size(pos_of_speakers,1);
size_t=size(t,2);

dist_table=zeros(x,y);
phase_table=zeros(x,y);
table=zeros(size_t,x); % sorok szama=diszkrét idopontok szama, oszlopok: mikrofonok

% tavolsagertetek kiszamitasa
for i=1:x % mikrofonok szama: sorok szama

    for j=1:y %hangsugarzok: oszlopok szama

        dist_table(i,j)=sqrt( (pos_mics(i,1)-pos_of_speakers(j,1))^2 +...
            (pos_mics(i,2)-pos_of_speakers(j,2))^2+(pos_mics(i,3)-pos_of_speakers(j,3))^2);
        end
    end

end

% tablazat kiszamitasa
for i=1:x % mikrofonok szama: oszlopok szama

    for j=1:y

        for k=1:size_t % sok diszkrét idopont: sok sor

            table(k,i)=table(k,i)+amplitude_of_speakers(j)*exp(sqrt(-1)*2*pi*...
                frequency_of_speakers(j)*(t(1,k)-dist_table(i,j)/sound_speed));

        end
    end

end

end
```

E.3. Calcpattern.m fájl

```
function [pattern]=calcpattern(pos_mics,table,angle,sound_speed,fs)

counter=0;
mic_dist_table=zeros(size(pos_mics,1),1);

for i=1:size(pos_mics,1)

    mic_dist_table(i,1)=pos_mics(i,1)-pos_mics(1,1);

end

%frekvenciaertekek, osszesen tablazat/2 sora szamu ertekek
freq_values=linspace(0,fs/2,length(table(:,1))/2);

%fft tablazat a sima tablazatbol
ffttable=zeros(size(table,1),size(table,2));

%fft tabla elkeszitese
for i=1:size(table,2)

    %fft szamitasa
    ffttable(:,i)=fft(real(table(:,i)));

    %normalas es shifteles
    ffttable(:,i)=fftshift(ffttable(:,i)/length(ffttable(:,i)));

end

ffttable2(:,:)=ffttable(length(table(:,1))/2+1:length(table(:,1)),:);

figure();
plot(freq_values,(20*log10(abs(ffttable2(:,1)))))
    title('FFT eredmenye');
    xlabel('Frekvencia (Hz)');
    ylabel('Amplitudo (dB)');

%minden frekire vizsgalat
for m=1:size(freq_values,2)

    %ennek keressuk majd a maximumat
    %ha megfeleloen nagy az amplitudo
    if ( 20*log10(mean(abs(ffttable2(m,:)))) > -10 )

        %minden szogre
        for i=1:size(angle,2)

            %fi ertekek kiszamitasa minden mikrofonra, az elso mikrofontol
            %vett faziskulonbseget szamitja
```

```

tau=0;
fi_table=zeros(size(pos_mics,1),1);

for d=1:size(pos_mics,1)

    tau=mic_dist_table(d,1)*cos(angle(i)*2*pi/360)/sound_speed;
    fi_table(d,1)=2*pi*freq_values(1,m)*tau;

end

x=0;

for s=1:size(ffttable2,2)

    x=x +ffttable2(m,s)/ffttable2(m,1)*exp(-sqrt(-1)*fi_table(s,1));

end

%sorai az egyes talalt frekiertekek, egy sorban pedig az ott
%talalható teljesitmenymaximumok
angles(m,i)=abs(x);
end

[max_value,max_place]=max(angles(m,:));

counter=counter+1;
pattern(counter,:)=angles(m,:);
szogmegoldas(1,counter)=angle(1,max_place);
frekimegoldas(1,counter)=freq_values(1,m);

end

end
szogmegoldas
frekimegoldas

```


F.4. Calcrealpattern.m fájl

```
function [realpattern]=calcrealpattern(pos_mics,pos_of_speakers)
%calculates the real pattern
realpattern=zeros(1,size(pos_of_speakers,1));
x=ceil(size(pos_mics,1)/2);
mic_x=pos_mics(x,1);

for i=1:size(pos_of_speakers,1)

    realpattern(1,i)=asin(pos_of_speakers(i,2)/sqrt((pos_of_speakers(i,1)-mic_x)^2+...
    pos_of_speakers(i,2)^2));
    realpattern(1,i)=realpattern(1,i)*360/(2*pi);
    if (pos_of_speakers(i,1) < mic_x)

        realpattern(1,i)=180-realpattern(1,i);
    end
end
end
```

F.5. Polarfig.m fájl

```
function []=polarfig(angle,pattern)

anglerad=zeros(1,length(angle));
anglerad=angle.*(pi/180);
for i=1:size(pattern,1)
    figure()
    polar(anglerad,pattern(i,:));
end
end
```

F.6. Erzekenyseg.m fájl

```
function [erzekenyseg_szoge]=erzekenyseg(angle,pattern,angle_resolution)

erzekenyseg_szoge=zeros(1,size(pattern,1));

for i=1:size(pattern,1)
    clear x;
    max_fele=max(pattern(i))/2;
    x=find(pattern(i,:) < (max_fele+angle_resolution/2) & pattern(i,:) > (max_fele-angle_resolution/2));
    erzekenyseg_szoge(i)=abs(angle(max(x))-angle(min(x)));
end
end
```