



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**  
Villamosmérnöki és Informatikai Kar  
Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék

Csepreghy Márton

**ZENGŐ TEREK FEJHALLGATÓ  
ALAPÚ HANGTÉR-  
REPRODUKCIÓJA**

KONZULENS

**Dr. Firtha Gergely**

BUDAPEST, 2021

# Tartalomjegyzék

<b>Összefoglaló .....</b>	<b>4</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>5</b>
<b>1 Az emberi térhallás jellemzői.....</b>	<b>6</b>
1.1 A fül felépítése .....	6
1.2 Irányhallás .....	8
1.3 Távolságérzet .....	12
1.4 Összegzés .....	12
<b>2 Hangszóró alapú hangtér-reprodukciós módszerek.....</b>	<b>13</b>
2.1 VBAP alapú rendszerek .....	13
2.2 Hangtér-szintézis rendszerek .....	16
<b>3 A fejhallgató alapú hangtér-reprodukció .....</b>	<b>18</b>
3.1 HRTF meghatározása.....	19
<b>4 Zengő terek modellezése tükörforrás-módszerrel .....</b>	<b>23</b>
4.1 A diffúz közelítés és a sugárkövetés elve .....	23
4.2 Reflexiók modellezése tükörforrások segítségével .....	24
4.3 Tükörforrások rendje.....	26
4.4 Tükörforrások érvényessége .....	27
4.5 Terem impulzusválasz.....	29
<b>5 A hangtér-reprodukciót megvalósító szoftver felépítése és működése .....</b>	<b>33</b>
5.1 A program működése .....	33
5.2 Fontosabb programozási feladatok, osztályok és funkcióik .....	38
5.3 A kód osztálydiagramja.....	41
5.4 A program használata során tapasztaltak .....	42
<b>6 Összegzés.....</b>	<b>44</b>
<b>Irodalomjegyzék.....</b>	<b>45</b>

# HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott **Csepreghy Márton**, 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 hitelesített felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Kelt: Budapest, 2021. 05. 22.

.....  
Csepreghy Márton

# Összefoglaló

A binauralizáció egy, a virtuális valóság alkalmazásokban gyakran alkalmazott fejhallgató alapú hangtér-reprodukciós módszer. A technika segítségével megfelelő mérési adatbázis alapján tetszőleges irányból érkező hullámfrontok a hallgató fülénél tökéletesen visszaállíthatók, ezzel tökéletes térhatást elérve.

A zárt, zengő terek akusztikai modellezésére használt leggyakoribb módszer az ún. tükörforrások módszere. A technika egyszerű közelítésekkel élve minden egyes falreflexiót egy-egy akusztikai pontforrásként, ún. tükörforrásként modellez, amely pozíciója az eredeti forráspozíció és a teremgeometria függvénye. Egy adott megfigyelési pontban a teljes kialakult hangtér az eredeti és ezen tükör-hangforrások terének összegeként áll elő.

A binauralizációs technika a tükörforrások módszerével való ötvözése lehetővé teszi zengő terek akusztikai jellemzőinek valós idejű visszaállítását. Ezzel gyakorlatilag a hallgató fejhallgató segítségével egy tetszőleges modellezett termet virtuálisan bejárhat.

A hallgató feladata olyan szoftver implementálása Matlab környezetben, amely hatékonyan implementálja a tükörforrások módszerén alapuló teremmodellezést, az eredményül kapott pontforrás-sokaságot valós időben binauralizálja, valamint egy választott célhardver segítségével megvalósítja a megfigyelő pozíciójának és orientációjának követését.

# Abstract

Binauralization is a commonly used headphone-based sound field reproduction method. With the help of this technique with proper measured data, a sound wave incoming from any direction can be reproduced at the listener's eardrums, creating a theoretically perfect sense of direction.

The most frequently used technique for modelling closed reverberant fields is the Mirror Source Method. This technique uses a simple approach to model each wall reflection as a mirrored point source. The position and orientation of each point source depends on the room geometry. In a given observation point the total sound field is the sum of the field of the original source and a number of these mirror sources, that meet certain criteria.

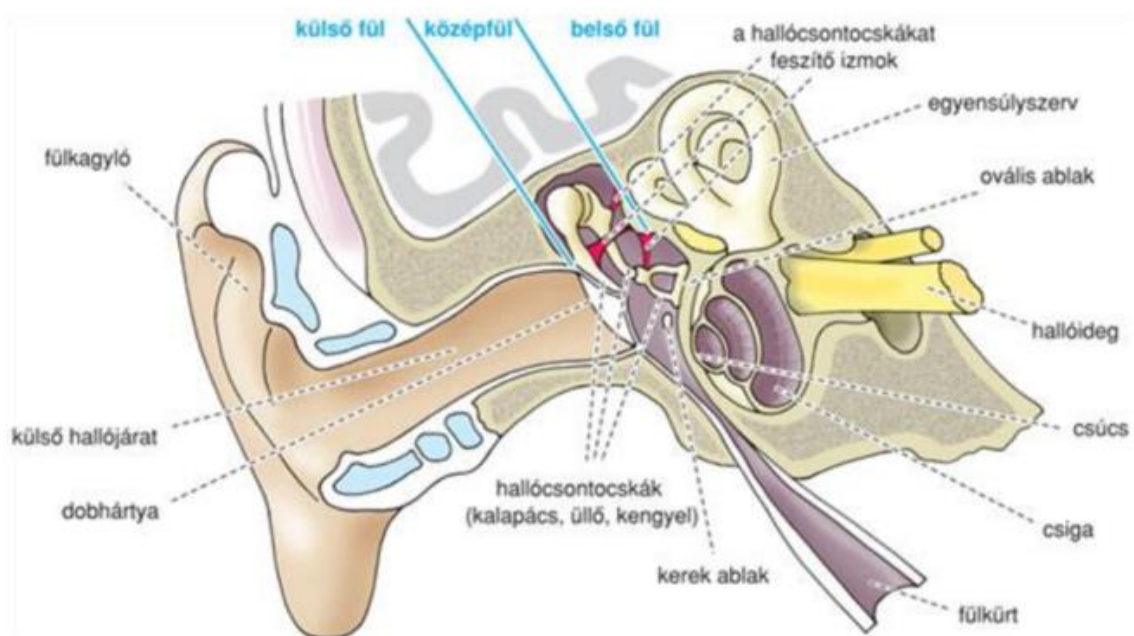
The combination of the binauralization method with the Mirror Source Method allows a reproduction of the acoustic properties of reverberant fields. The listener perceives reflected soundwaves from the direction of the reflection and can move and listen around in any modelled virtual room.

The students' task is to create a software in Matlab environment, which efficiently implements room modelling based on the Mirror Source Method, binauralizes the resulting mirror source field, and tracks the realtime position and orientation of the listener with a chosen hardware.

# 1 Az emberi térhallás jellemzői

Az egyes hangok irányérzete számos tényezőn múlik. Ezek megértéséhez elsőként részletesen ismertetem a fül felépítését, hallásunk működésének mechanizmusát. Hangok irányának meghatározásában a két dobhártyán mérhető hangnyomás-idő függvény egyes tulajdonságai, főként a két időfüggvény egymáshoz viszonyított különbségei játszanak szerepet, melyek objektívan meghatározható aspektusait vizsgáljuk. Hangforrások lokalizációja során kiemelt jelentőségű ezen kívül a fej mozgatásának szerepe, melynek élethű szimulációja a dolgozatom egyik célja.

## 1.1 A fül felépítése



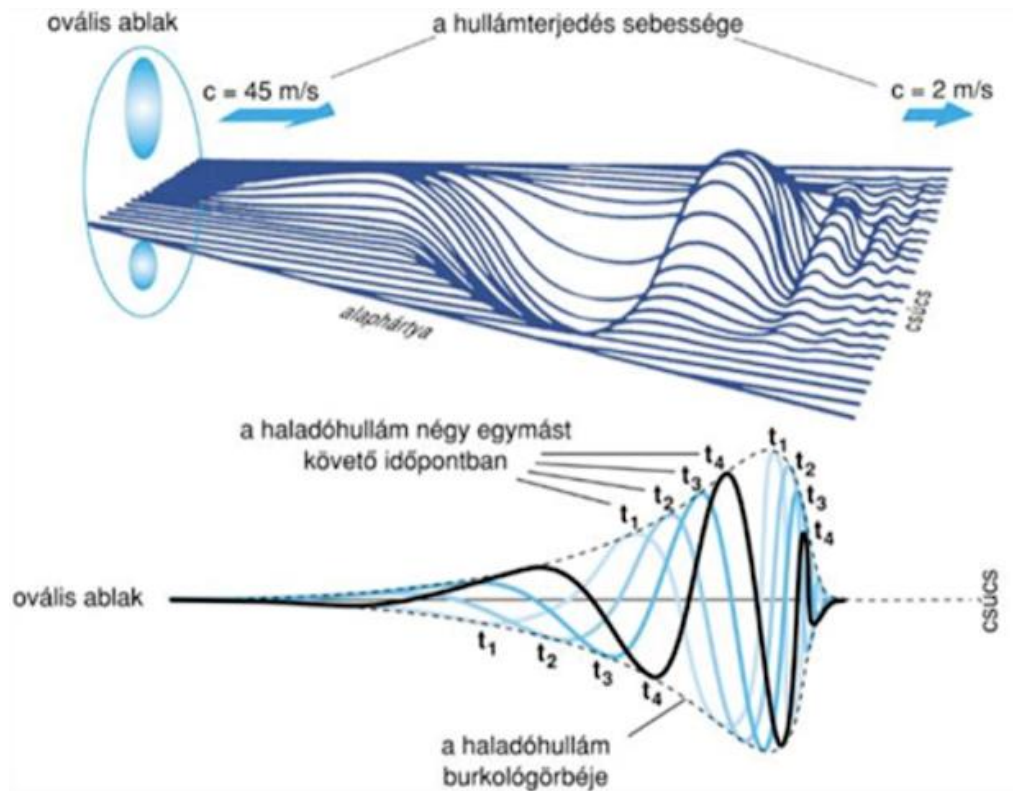
1. ábra A fül felépítése

A fül 3 részre osztható: külső, közép- és belső fülre. A külső fül a fülkagylóból és a hallójáratból áll. A fülkagylónak főként nagyfrekvenciákon van szerepe az irányérzet kialakulásában.

A középfül legfontosabb részei a dobhártya, a hallócsontocskák és a fülkürt. A középfülben található levegő nem áll közvetlen kapcsolatban a külső légtömeggel, így a dobhártya két oldalán nemkívánatos statikus nyomáskülönbség alakulhat ki. Ezt szabályozza a fülkürt a középfül statikus nyomásának változtatásával. A dobhártyának a mechanikai rezgés továbbítása mellett fontos akusztikai impedanciaillesztési szerepe is

van. A hallócsontocskák bemeneti impedanciája eltér a külső fül akusztikai impedanciájától. Emiatt a dobhártya nélkül a közeghatáron reflexió alakulna ki, amely azt eredményezné, hogy az érkező hullám nem teljes mértékben lép be a középfülbe, egy része visszaverődik. Ennek elkerülése a dobhártya felületén eltérő feszességű részek találhatóak, melyek különböző frekvenciákon biztosítják a reflexiómentességet. A hallócsontocskák a rezgés megfelelő erősítését biztosítják a középfül és a belső fül között. A csontocskákat a dobhártya rezgeti meg, ezt a rezgést pedig a belső fülben elhelyezkedő, kisebb méretű ovális ablak felé felerősítve továbbítják.

A belső fülben történik a mechanikai hullám ingerületté alakítása. A hallócsontocskák rezgését átveszi az ovális ablak, ahonnan a hanghullám a csigában lévő folyadékban terjed tovább. A csiga legfontosabb része az alaphártya, melynek a csigában lévő folyadékból átvett rezgései ingerlik a hallóidegeket. A hanghullám terjedési sebessége az alaphártya elejétől végéig egyre csökken, értéke  $45 \frac{m}{s}$  és  $2 \frac{m}{s}$  között változik, illetve a hártya szélessége nő. Ez segít a nagy hullámhosszal rendelkező alacsonyfrekvenciás hangok észlelésében, ugyanis így az alaphártya végénél a hullámfrontok egyre közelebb kerülnek egymáshoz, lehetővé téve, hogy nagy hullámhossz esetén is jól megkülönböztethetők legyenek. Az alaphártya mentén kialakulhat keresztirányú állóhullám, melynek alapfrekvenciája a hártya szélességétől és a hang adott helyen vett terjedési sebességétől függ. Egy adott frekvenciához tartozó keresztirányú állóhullám az alaphártya hossza mentén egyértelműen meghatározható távolságban van. A beérkező hullám amplitúdója azon a helyen vesz fel maximális értéket, ahol létrejön a keresztirányú állóhullám (lásd 2. ábra).



2. ábra Az alaphártya felépítése és a rajta kialakuló hullámcsomag

A belső fül receptorsejtjeinek (szőrsejtek) ingere az alaphártya mozgása. Az alaphártya adott pontján létrejövő állóhullám az ott elhelyezkedő szőrsejteket hozza ingerületbe, amely ingerület a hallóideg a receptorsejtekhez kapcsolódó rostjain keresztül jut a központi idegrendszerbe. A hanginformáció itt kerül majd feldolgozásra. Az alaphártyán haladó hullám kitérésmaximumának helye a hullám frekvenciájától függ, mely azt jelenti, hogy frekvenciatartománybeli információkat hallunk valójában, tehát a csiga frekvenciaanalizátorként funkcionál. Kutatások kimutatták [2], hogy körülbelül 500Hz alatt a frekvenciával fordítottan arányos az ingerületkeltés helyének távolsága az alaphártyán, efölött azonban a frekvencia logaritmusával arányos. Ez azt eredményezi, hogy 500Hz alatt jóval pontosabban el tudjuk különíteni az egyes frekvenciakomponenseket, magasabb frekvencián pedig egyre kevésbé. Ezt az effektust használja ki például a Mel skálás szűrés is.

## 1.2 Irányhallás

Az emberi hallórendszer képes egyes hangforrások irányát és távolságát is megkülönböztetni, melynek alapja elsődlegesen a két fülben érzékelt hangok eltérése. Ezt számos szubjektív tényező is befolyásolja. Egy hangforrás irányának meghatározhatósága egyénenként változik. Általánosan elmondható, hogy vízszintes



irányban, a hallgató előtt legpontosabb, legjobb esetben körülbelül  $1^\circ$  felbontású, melyet a későbbiek során ki fogunk használni.

Eltérő helyről érkező, egymáshoz képest késleltetett hangok esetén felléphet az úgynevezett Haas-hatás. Ennek feltétele, hogy az egyes hangok egymáshoz viszonyított késleltetése legfeljebb 30ms legyen. Ebben az esetben a külön hangokat egy hangeseményként érzékeljük, melynek iránya az időben előbb beérkező hangéval egyezik meg. Ilyenkor az időben később érkező hangot egyáltalán nem érzékeljük. Ezt a hatást például nagy hosszúságú termék hangosításánál is kihasználják.

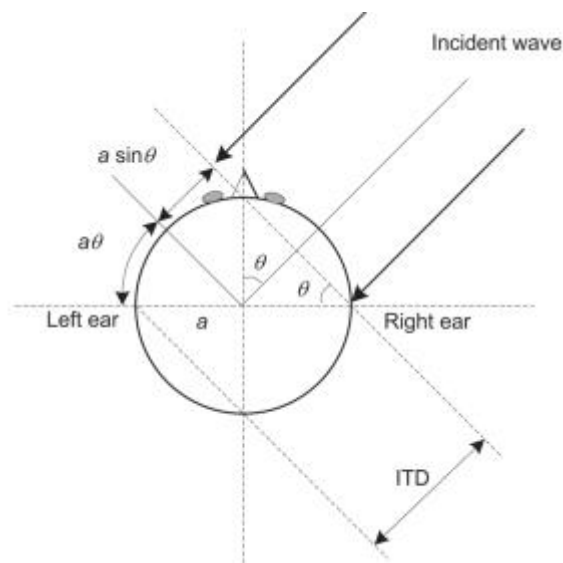
Eltérő irányú (nem azonos) hangforrások együttes megszólalása esetén azok irány- és távolságinformációja elkülönül, melyet a későbbiekben kihasználunk több hangforrással rendelkező hangterek reprodukciója esetén.

### 1.2.1 Lokalizációs jellemzők

Egy adott hangforrás iránymeghatározása több jellemző együttes figyelembevételével történik, melyek főként a fej és a fülkagyló geometriájából adódnak.

#### 1.2.1.1 Interaurális időkülönbség

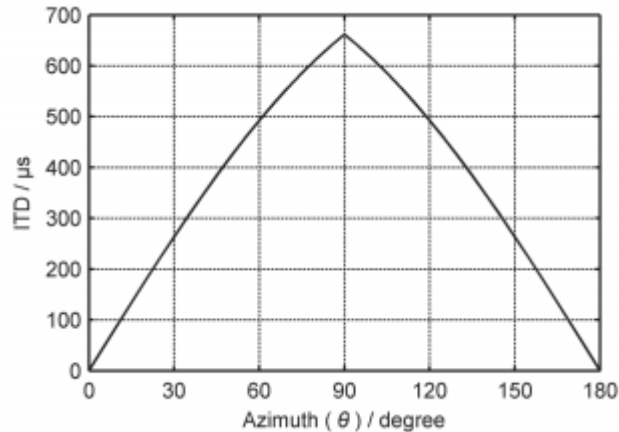
Az interaurális időkülönbség a hangforrás és a fülek eltérő távolságából adódik. Az eltérő úthosszak miatt a hang az egyik fülbe késleltetve jut el, melynek nagy szerepe van a hangforrás lokalizációjában.



3. ábra Interaurális időkülönbség

Ezt a késleltetést legkönnyebben egy  $a$  sugarú kör alakú fej esetén tudjuk modellezni, feltételezve, hogy a beeső hullám síkhullám. Ebben az esetben  $\theta$  szögben a késleltetés

$$ITD(\theta) = \frac{a}{c} (\sin \theta + \theta) \text{ ahol } 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$



4. ábra ITD a forrás pozíciójának függvényében. Az ábrán szereplő  $0^\circ$ -a hallgatóval szemközi pozíció.

0,7kHz-1,5kHz tartományban fontos lokalizációs jellemző a késleltetésből adódó fáziskülönbég is. 0,7kHz alatt a két fül távolsága egy nagyságrendbe esik a fél hullámhosszal (vagy kisebb), így a fáziskülönbég alacsony. 1,5kHz felett a fáziskülönbég meghaladja a  $2\pi$  értéket, így megbízhatatlan az érzékelt fáziskülönbég.

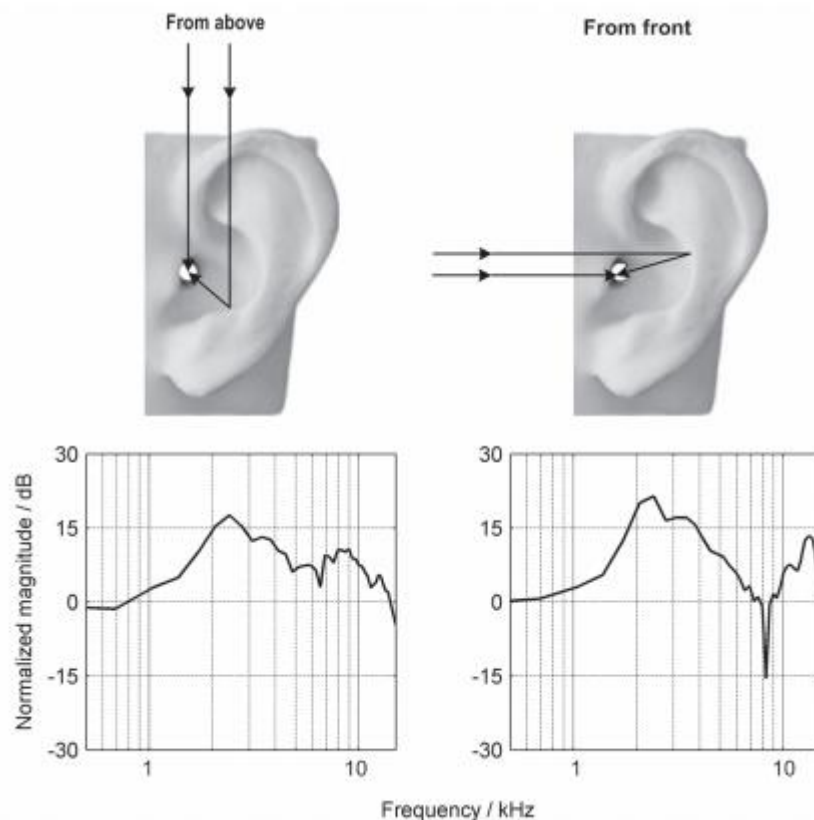
### 1.2.1.2 Interaurális jelszintkülönbség

Az interaurális jelszintkülönbség (Interaural Level Difference, ILD) főként a fej árnyékoló hatásának köszönhető. Amennyiben a hangforrás nem a hallgatóval szemben helyezkedik el, a hangforrástól távolabb eső fülbe a hullám nem direkt úton jut el, hanem a fej körül diffraktálódva (lásd 3. ábra), mely jelentős csillapítást eredményez, főleg nagy frekvencián. Amennyiben ismertek az egyes fülek és a hangforrás közötti átviteli függvények, az interaurális jelszintkülönbség a következő módon származtatható belőlük:

$$ILD(r, \theta, \Phi, f) = 20 \log_{10} \left| \frac{P_R(r, \theta, \Phi, f)}{P_L(r, \theta, \Phi, f)} \right|$$

### 1.2.1.3 Spektrális jellemzők

Számos tanulmány [5] szerint egyes esetekben az észlelt hang spektrális jellemzői is szerepet játszanak a lokalizációban. Ezt elsősorban a fülkagyló nagyfrekvenciás viselkedése okozza. Nagy frekvenciákon a fülkagylóból a hallójáratba jutó hang több úton is terjed, mely interferenciát eredményez. Az interferencia jól felismerhető kioltásokat eredményez a spektrumban, mely információval bír a hangforrás irányáról. Ezen kívül a fülkagyló és a hallójárat modális viselkedése is szerepet játszik a nagyfrekvenciás iránymeghatározásban [6], ezért azok felépítése az irányhallás szempontjából is fontos.



5. ábra A fülkagyló szerepe nagyfrekvenciás hangterjedésben. Alul a dobhártyán mért hangnyomás átviteli függvénye látható, föllette a hangforrás iránya, és a hang többutas terjedése.

Mivel a fülkagyló formája és nagysága egyénekenként nagymértékben eltérhet, ezért ezen effektus modellezése rendkívül komplex.

### 1.2.1.4 Fejmozgatás

Lokalizáció során nem csak az egyes lokalizációs jellemzők nagyságát vesszük figyelembe, hanem azok változását is az irány függvényében. A fej (akár önkéntelen) mozdulásával pontosabb információt nyerhetünk a hangforrás irányáról. Ezt az effektust használjuk ki például olyan esetekben, mikor el kell dönteni, hogy egy adott hangforrás

a fej előtt, vagy mögött található. Éppen ezért kiemelt jelentőséggel bír egy hangforrás élethű reprodukciója szempontjából a fej pozíciójának követése.

### **1.3 Távolságérzet**

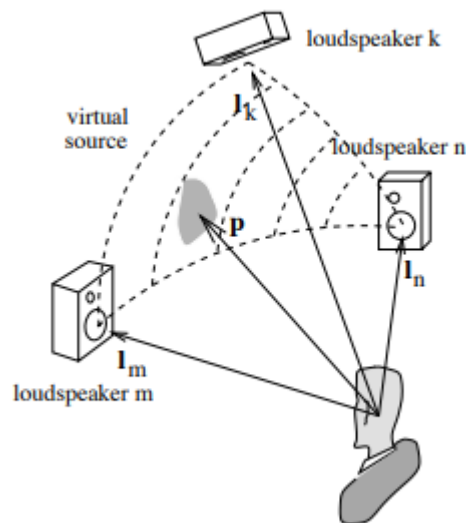
A hangforrás lokalizációja során nem csak irányt, de távolságot is képesek vagyunk érzékelni. Általánosan elmondható azonban, hogy a távolságérzet meglehetősen pontatlan az irányérzethez képest, meghatározó jellemzői pedig nehezebben leírhatóak. Főként a relatív hangerő és a hangforrás vélhető eredeti hangjához képest vett eltérések szolgálnak alapjául [7].

### **1.4 Összegzés**

Mint látható, az emberi hallás igen összetett rendszer. Az iránymeghatározás alapjául szolgáló lokalizációs jellemzők reprodukálásához rendkívül pontos hangreprodukcióra van szükség, mely mind fázis, mind amplitúdó szempontjából megfelelő. Sok múlik ezen kívül az akusztikai környezet viszonyain, illetve tanult és szubjektív tényezőkön is, mely függhet az érzékelt hangtól és a környezettől egyaránt. Ezeket jelen dokumentumban nem vizsgáljuk részletesen.

## 2 Hangszóró alapú hangtér-reprodukciós módszerek

Több hangforrás együttes megszólaltatásakor bizonyos feltételek teljesülése esetén a hangforrás hallgató által érzékelt iránya nem egyezik meg a tényleges hangforrások irányával. A hallgató által érzékelt forrást nevezzük virtuális forrásnak. A virtuális forrás helyén nincsen valós hangforrás, azonban a hallgató számára megkülönböztethetetlen egy valós hangforrástól.



6. ábra Virtuális forrás

Térhangzás-reprodukcióról akkor beszélhetünk, amikor valamely rendszer segítségével tetszőleges számú virtuális forrást reprodukálunk, ezzel úgynevezett hangképet hozva létre. Ez történhet hangszórókkal vagy fejhallgató segítségével. Jelen fejezetben a hangszóró alapú megoldásokat tárgyaljuk.

A virtuális források előállítására történhet az egyes hangszórók jelszintjének megfelelő változtatása segítségével, vagy egy pontosabb megközelítésben a hangszórók amplitúdójának és fázisának együttes változtatásával.

### 2.1 VBAP alapú rendszerek

Az egyes hangszórók amplitúdókülönbsége miatt létrejövő virtuális forrás helyére először Bauer adott numerikus összefüggést [2]. Ez a modell a hangforrások jelszintjének függvényében írja le az érzékelt forrás elhelyezkedését a hallgató körül elhelyezett körön lévő tetszőleges hangforrás-elrendezésre. A modell nem veszi figyelembe a fej árnyékoló

hatását, és a fázisviszonyokat sem. Kiindulási alapja az interaurális időkülönbség meghatározása egy 2 hangszórós rendszerben a források jelszintjeinek függvényében [3]:

$$ITD_p = -\frac{1}{\pi f} \tan^{-1} \left[ \frac{L - R}{L + R} \tan(ka \sin \theta_0) \right]$$

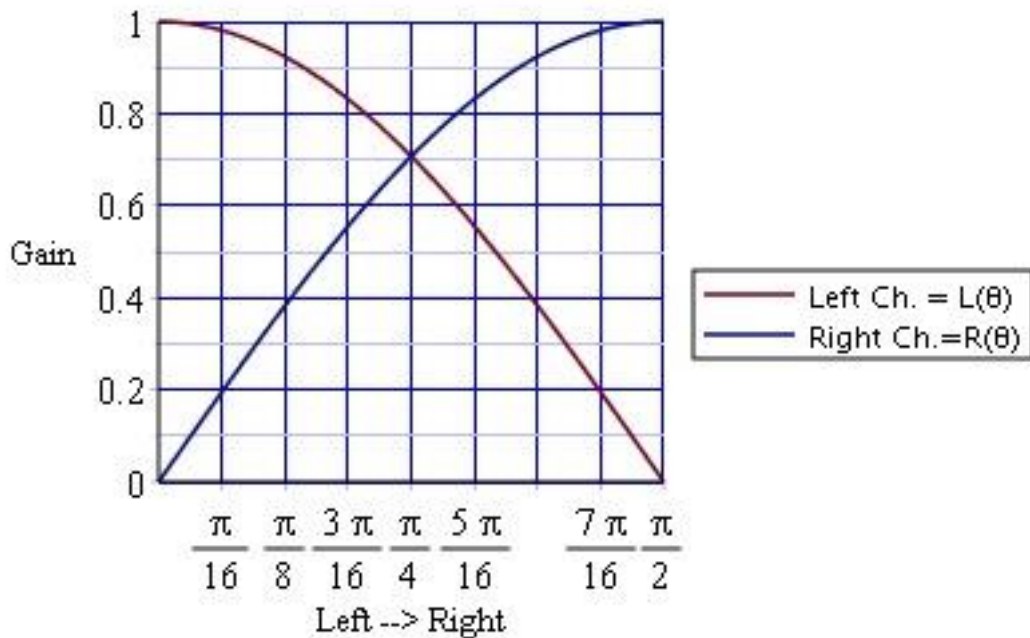
Ahol  $L$  és  $R$  a jobb és bal hangszóró amplitúdója,  $\theta_0$  a hangszórók helyének iránya a hallgatóval szemközi irányhoz képest. Ekkor a 1.2.1.1. fejezetben használt közelítésekkel élve meghatározható a virtuális forrás iránya:

$$\sin \theta_I = -\frac{1}{ka} \tan^{-1} \left[ \frac{L - R}{L + R} \tan(ka \sin \theta_0) \right]$$

Alacsony frekvenciákon  $ka \ll 1$ , ekkor a kifejezést helyettesíthetjük a Taylor sorának első elemével:

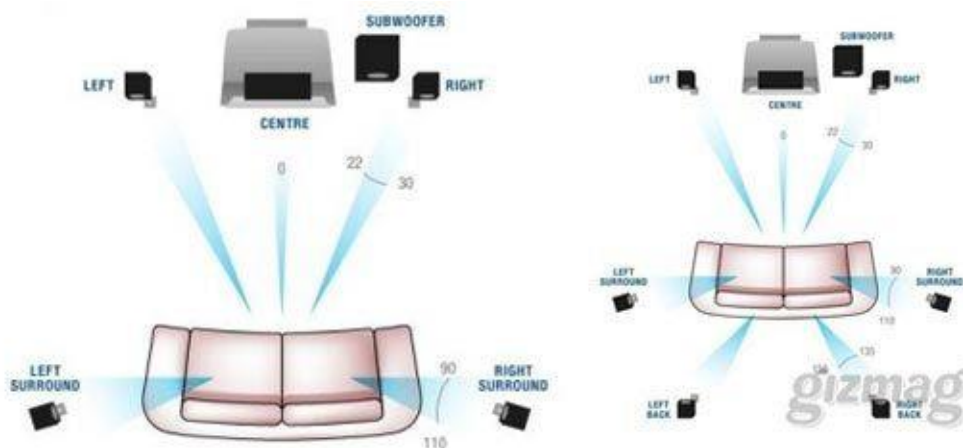
$$\sin \theta_I = -\frac{L - R}{L + R} \sin \theta_0$$

Ezen összefüggés átrendezésével megkaphatóak egy tetszőleges irányba helyezett virtuális forrás létrehozásához szükséges jelszintek az egyes hangszórókra. A módszer a VBAP (Vector Based Amplitude Panning – vektoralapú amplitúdópanorámázás) elnevezést kapta.



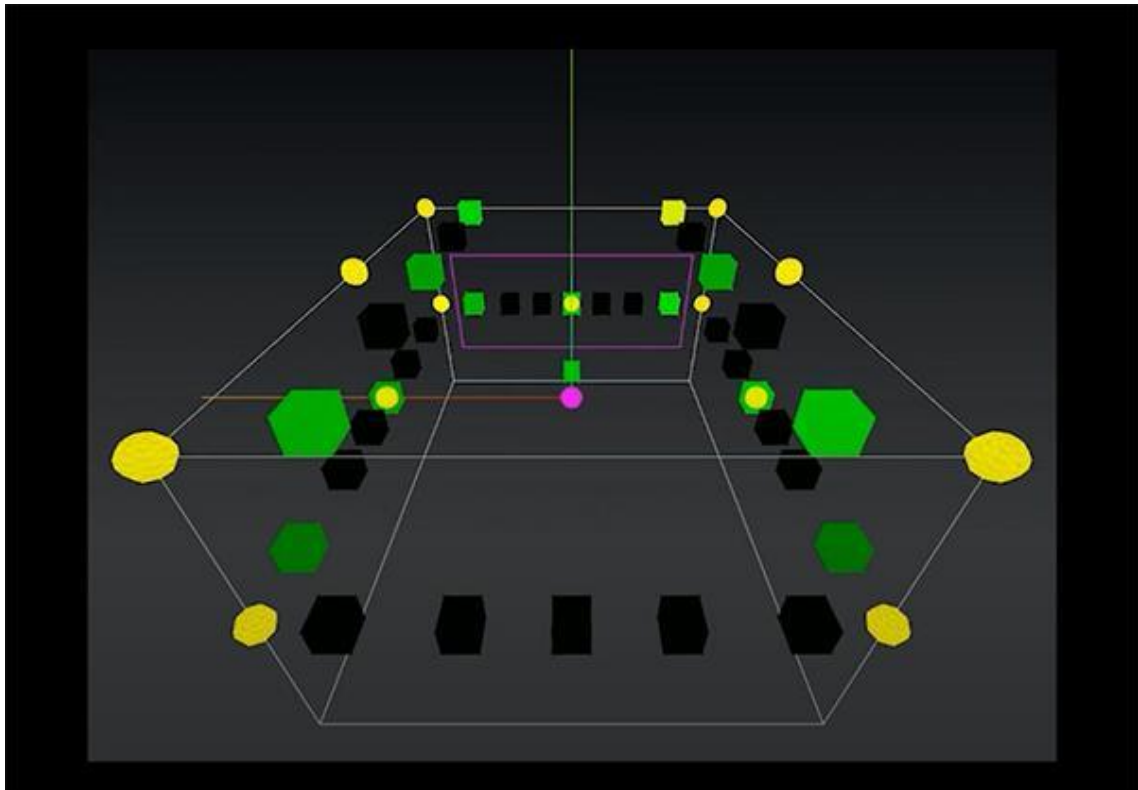
7. ábra Konstans energiájú kétszornás amplitúdó-panorámázás a virtuális forrás helyének függvényében

A térhangzás elérésének legnagyobb úttörői a mozi hangrendszerek fejlesztői voltak. Az első igazán elterjedt térhangzást reprodukáló rendszer a Dolby Stereo volt, később házimozsi célra fejlesztették ki az 5.1 és 7.1 rendszereket. Ezen rendszerek közös alapelve, hogy a hallgató körül szabványos pozíciókban elhelyezett hangszórók VBAP alapú vezérlésével hoznak létre virtuális forrásokat. Hatalmas hátrányuk azonban, hogy az egyes hangszórók jelei csak az előírt megfigyelési pozícióban (az úgy nevezett sweet spotban) összegződnek helyesen, ebből kimozdulva a virtuális forrás nem jön létre, szétesik a hangkép.



8. ábra 5.1 és 7.1 házimozsi rendszer elhelyezése

Új megközelítést alkalmaz a Dolby Atmos rendszer. Ez új alapra helyezi az audiokódolást, megadott elrendezésű hangszórórendszer vezérlőjelei helyett az egyes hangforrásokat audio objektumként kezeli, saját pozícióval és jellel. A felhasználó ezek után a saját hangrendszerének geometriája szerint állítja elő ezekből a megfelelő vezérlőjeleket VBAP segítségével.



9. ábra Dolby Atmos rendszer egy lehetséges elhelyezése

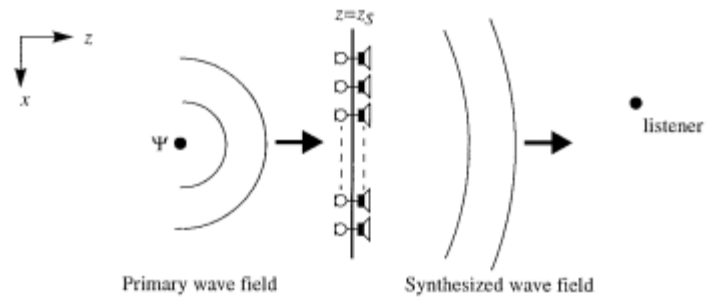
A VBAP a mai napig rendkívül elterjedt mozi és házimozis rendszereken kívül egyéb területeken is, például számítógépes játékok, virtuális valóság alkalmazások, valamint hangtechnikai eszközök esetében. Ez annak köszönhető, hogy alacsony számításigényű, és elfogadhatóan realiztikus hangérzetet hoz létre.

A számítási kapacitás jelentős növekedésével és a térhang-reprodukciós rendszerek fejlődésével azonban napjainkban lehetőség nyílik ennél összetettebb és realiztikusabb virtuális forrás reprodukcióra is.

## 2.2 Hangtér-szintézis rendszerek

Jelenleg is fejlesztés alatt álló módszer a hangtér-szintézis (WFS) módszere. Ennek alapja, hogy a fázisinformációk figyelembevételével egy nagy számú, szorosan elhelyezett hangszóró-sokaság előtti térrészben ezek megfelelő vezérlésével reprodukáljuk a virtuális forrás fizikai hangterét. A korábbi megoldásokkal szemben hatalmas előnye, hogy nem csak egy konkrét megfigyelési pontban, hanem egy kiterjedt területen produkál megfelelő hangérzetet, hátránya azonban, hogy jelenleg nincs rá szabványos megoldás, illetve a nagyszámú hangszórórendszer drágább az alternatív megoldásoknál.



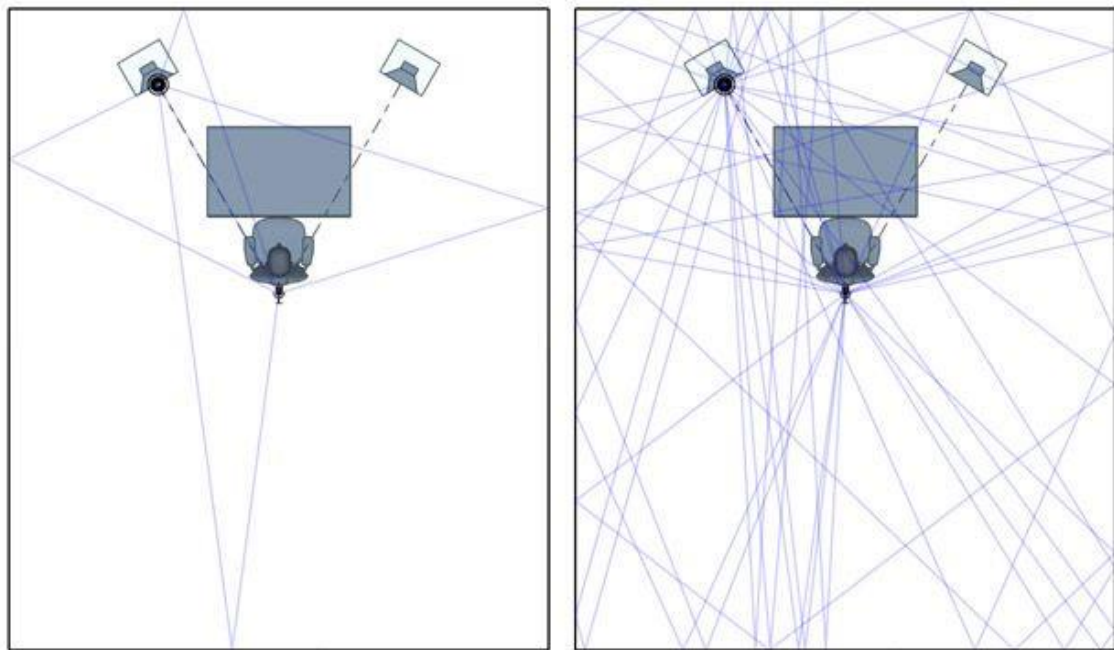


**10. ábra WFS rendszer**

Fontos azonban, hogy a WFS módszer vezérlőfüggvénye virtuális pontforrások terét fázishelyesen összegzi a hangszórók pozíciójában, melyet a későbbiekben kihasználunk.

### 3 A fejhallgató alapú hangtér-reprodukció

Mint az előző fejezetben láthattuk, a hangszóró alapú hangtér-reprodukció esetén sok probléma lép fel. A hangszóró rendszer a hallgató tényleges mozgását nem képes követni, valamint többszörös jelterjedés is fellép a teremreflexiók miatt (lásd 11. ábra), azaz a hallgató helyiség akusztikai tulajdonságai is módosíthatnak a hangképen.

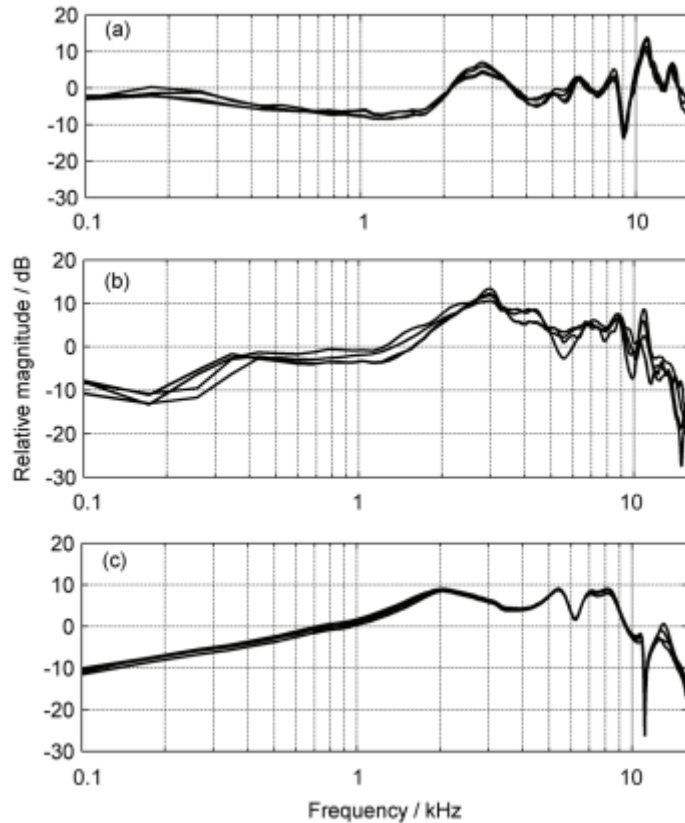


**11. ábra** Kétszórós hangszórórendszer egyszerűen és sokszorosán reflektált hangterjedése. Az ábrán csak a bal hangforrás hangterjedése látható.

Ennél ideálisabb, ha a hangteret fejhallgatóval reprodukáljuk, melynek eszköze a binauralizáció. A binauralizáció célja a bal és jobb dobhártyán mérhető jelek reprodukálása a virtuális forrás tulajdonságainak függvényében.

Fejhallgató használatával ez egyszerűbben megvalósítható, ugyanis így nincs áthallás a jobb és bal fülbe jutó jelek között, valamint az akusztikai környezet esetleges reflexiói sem adódnak hozzá az érzékelt hanghoz.

Probléma lehet a fej- vagy fülhallgató átviteli függvényének pontatlansága, ugyanis a fülbe érkező hangok spektrális tulajdonságai is hordoznak irányinformációt (lásd 1.2.1.3. bekezdés). Ennek kiküszöbölésére pusztán megfelelő fej- vagy fülhallgatót kell használnunk, így a továbbiakban ettől eltekintünk.



12. ábra 3 elterjedt fejhallgató modell átviteli karakterisztikája. Problémát okozhat az irányérzékelésben például a 10 kHz körüli kioltás az átvitelben az a, és c, esetben.

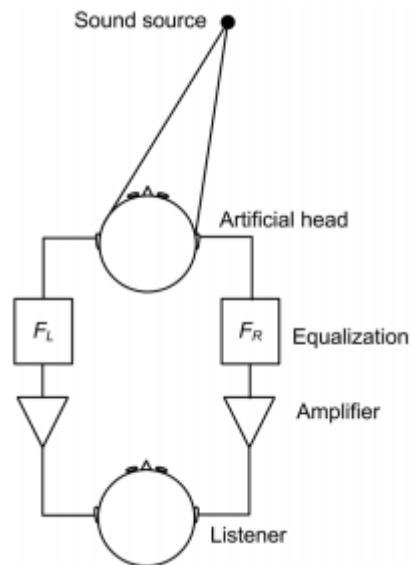
A gyakorlatban a jelek előállítása a virtuális forrás jelének szűrésével történik, úgynevezett HRTF (Head Related Transfer Function – fej viselkedését leíró átviteli függvény) szűrő segítségével. Ennek bemenete a virtuális forrás jele és iránya, kimenete a bal és jobb dobhártyán mérhető hangnyomásjel. A szűrő távolság-reprodukciót nem végez.

### 3.1 HRTF meghatározása

A HRTF meghatározását kétféle módon végezhetjük: modellezve és mérés alapján.

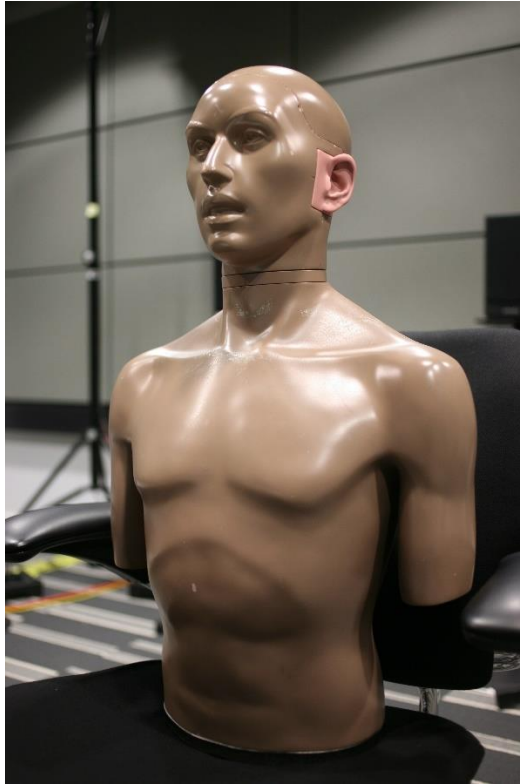
Mint azt az előzőekben tárgyaltuk (lásd 1.2.1 bekezdés), az egyes lokalizációs jellemzők modellezhetőek bizonyos egyszerűsítésekkel élve, például a fej formájára vonatkozóan. Ezek segítségével leírható elméleti alapon a jobb és bal fül fázis- és amplitúdóviszonya. Ennek előnye, hogy tér szerint folytonos átviteli függvényt eredményez, hátránya azonban, hogy az egyszerűsítésekből adódóan pontatlanabb, kevésbé valóságű. A gyakorlatban ritkán alkalmazott módszer.

Elterjedt módszer HRTF-meghatározásra a mérés alapú módszer, melynek lényege, hogy egy fejhez vagy egész felsőtesthez akusztikai és fizikai tulajdonságaiban rendkívül hasonlító próbatestet hoznak létre, melybe a dobhártyák pozíciójában mérőmikrofonokat helyeznek el.



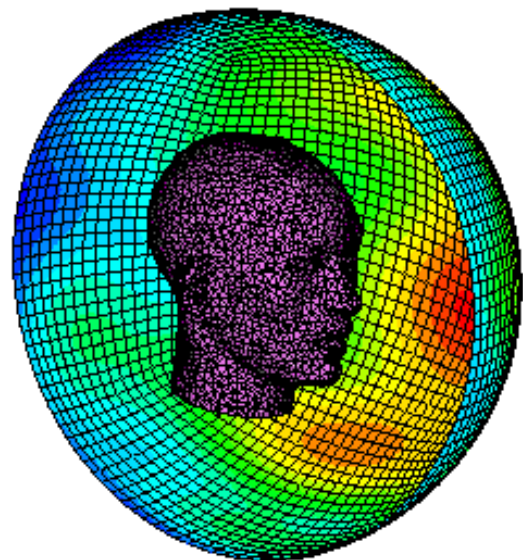
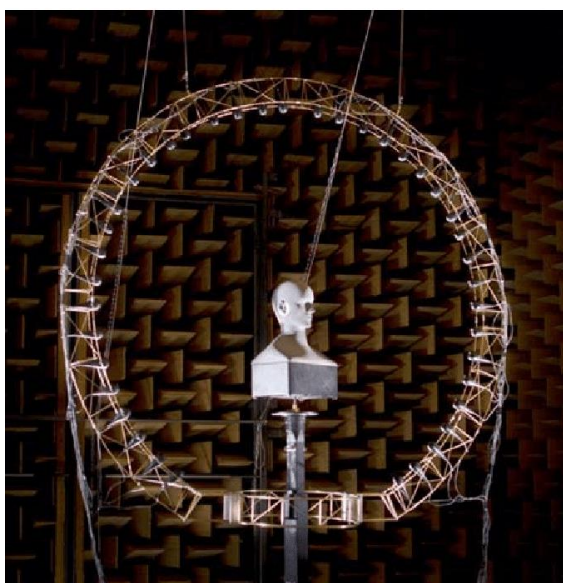
13. ábra Műfejes HRTF mérés alapú binauralizáció

A próbatest fülkagyló és hallójárat kialakítása rendszerint változtatható, ugyanis az 1.2.1.3. bekezdésben taglaltak szerint ez is fontos befolyásoló tényező nagyfrekvenciás jelek iránymeghatározása során.



14. ábra HRTF mérésre is alkalmazott műfejek

Ezután a próbatest körül diszkrét pontokban elhelyezett gerjesztésekre megmérhetőek az egyes átviteli függvények. A gyakorlatban a források pozíciójának változtatása helyett a műfejet forgatják megfelelő irányba. Ily módon diszkrét rácspontokban mérhető a HRTF. Amennyiben a térbeli felbontás növelésére van szükség, az egyes rácspontok között interpolációt lehet végezni.



15. ábra HRTF mérési elrendezése

A módszer előnye a modellezéssel szemben, hogy realiztikusabb, illetve figyelembe vesz olyan tényezőket, mint a fülkagyló és fej mérete, így jobban igazítható a hallgató tulajdonságaihoz.

A mért átviteli függvények adott szögben FIR szűrővel reprezentáltak, mely lehetővé teszi ezek valós idejű konvolúcióját.

$$p_L(t) = p(t) * h_L(\theta, \varphi, t)$$

$$p_R(t) = p(t) * h_R(\theta, \varphi, t)$$

Ahol  $p_L(t)$  és  $p_R(t)$  a bal és jobb fül jelei,  $p(t)$  a hangforrás jele,  $h_L(\theta, \varphi, t)$  és  $h_R(\theta, \varphi, t)$  pedig a HRTF impulzusválaszai a forrás pozíciójának függvényében.

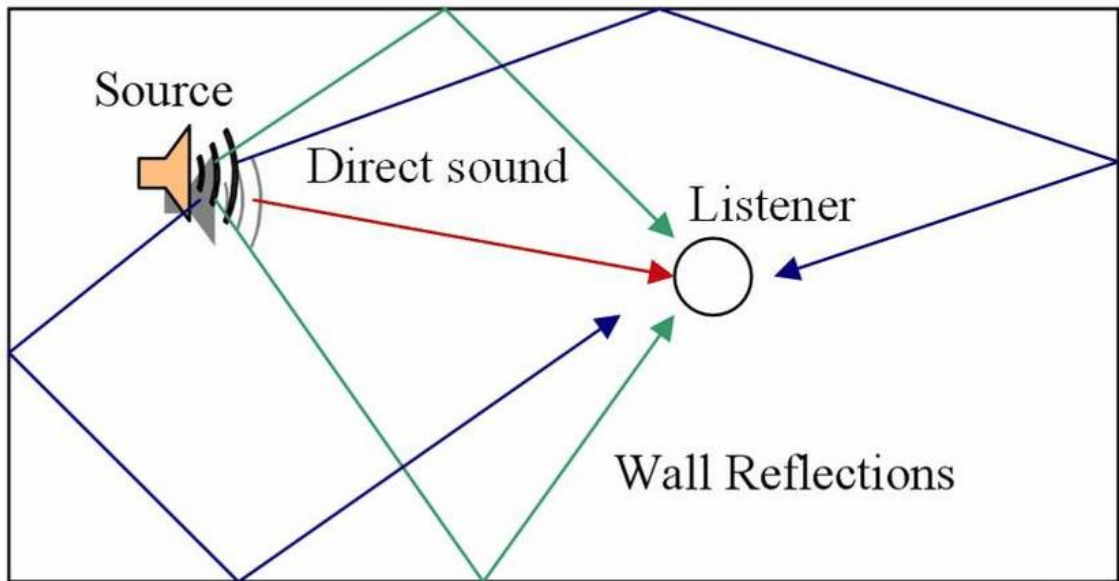
## 4 Zengő terek modellezése tükörforrás-módszerrel

Zengő terek megfelelő reprodukciójához szükséges az adott tér modellezése, mely esetünkben a tükörforrások módszerével történik. A tér legfontosabb jellemzői annak geometriája, valamint a határfelületek (falak) visszaverőképességét leíró reflexiós tényező. Ezen kívül feltétel a terem hangterének diffúz közelítése. A tükörforrások módszere a teremgeometria, reflexiós tényezők és a forrás elhelyezkedése, valamint orientációja függvényében egy pontforrás-sokaságot ad eredményül. Ezen pontforrás-sokaság ismeretében a binauralizáció módszerével reprodukálható a hallgató pozíciójában hallható hangzás.

### 4.1 A diffúz közelítés és a sugárkövetés elve

Zengő terek modellezése során egyszerűsítésekkel élünk a hangtér tulajdonságaira vonatkozóan. Az egyik ilyen a hangtér diffúz közelítése, mely szerint a teremben az egységnyi térfogatra eső hangenergia állandó, energiát csak a falreflexiók során veszítünk. Egy másik egyszerűsítés a reflexiók modellezése komplex visszaverődési tényezővel, melynek lényege, hogy a visszaverődést a visszavert és beeső hanghullám amplitúdójának hányadosával jellemezzük, mely egy, az adott visszaverő síkra jellemző komplex szám. A valóságban a falreflexiók ennél bonyolultabb frekvenciafüggésű, aluláteresztő jellegűek.

Ezekkel az egyszerűsítésekkel élve használhatjuk a sugárkövetés elvét, mely egy pontforrásból kiinduló hanghullámot a tér minden irányába „kilőtt” hangrészecskével helyettesít, melyek a falakról visszaverődnek. A hallgató az ő pozíciójába eljutó hangrészecskék összegét hallja.



16. ábra Hallgató pozíciójába eljutó hangrészecskék. Az ábrán pirossal jelölt a direkt hangterjedés, világoskékkel az egyszeres és sötétkéssel a kétszeres reflexió után a hallgató pozíciójába érkező pár hangrészecske.

## 4.2 Reflexiók modellezése tükörforrások segítségével

A fentiek alapján egy falról visszaverődő hang leírható egy olyan hangrészecskével, mely a reflexió pontjából indul a reflexió pillanatában a visszaverődésnek megfelelő irányba. Ez a feltétel teljesül, ha a fal síkjára tükrözzük az eredeti hangforrásunkat, az így létrehozott tükörforrás amplitúdóját pedig megszorozzuk a reflexió tényezővel. A falról visszavert hangrészecske az ebből a tükörforrásból induló hangrészecskével ekvivalens, ezért a hallgató pozíciójában (bizonyos feltételek mellett) elegendő az eredeti és a tükörforrások időtartománybeli jelét összegezni.

$$p_L(t) = p_s(t - \tau_s) + \sum_{i=1}^N (A_i \cdot p_s(t - \tau_i))$$

$p_L(t)$  a hallgató pozíciójában kapott jel időfüggvénye,  $N$  a tükörforrások száma,  $p_s(t)$  az eredeti hangforrás jelének időfüggvénye,  $A_i$  az egyes tükörforrások amplitúdóegyütthatója,  $\tau_i$  pedig az egyes hangforrások távolságából adódó késleltetés.  $A_i$  és  $\tau_i$  a következőképpen határozható meg:

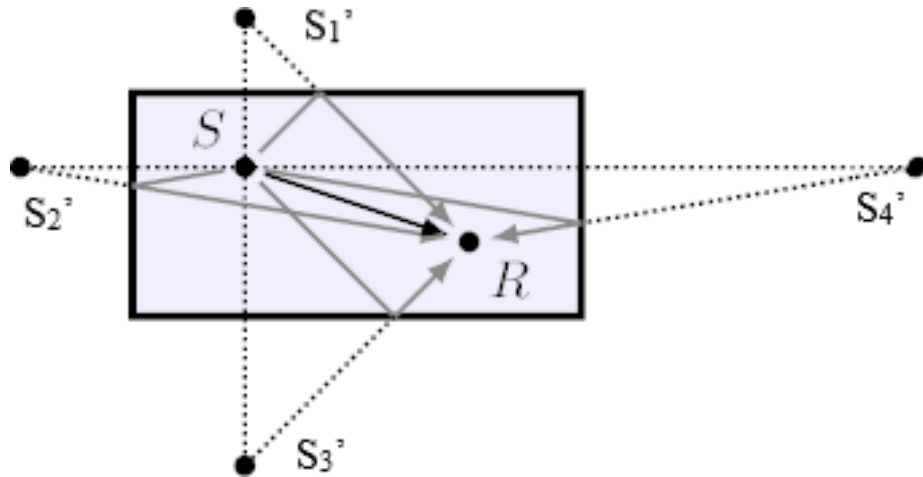
$$A_i = \prod_{n=1}^w \alpha_n$$

$$\tau_i = \frac{r_i}{c}$$



$W$  a tükörforrást létrehozó falak száma,  $\alpha_n$  a falak reflexiós tényezője,  $c$  a hanghullám terjedési sebessége,  $r_i$  pedig a forrás távolsága a hallgatótól.

Ezzel a módszerrel egy adott geometriájú hangteret és abban adott pozícióban elhelyezett hangforrást reprezentálhatunk egy egyszerű forrás-sokasággal.



17. ábra Tükörforrások ( $S_n'$ ) helyzete a hangforrás ( $S$ ) és a fal geometriájának függvényében

Egy adott falra tükrözést leírhatunk egy transzformációs vektor és egy eltolásvektor segítségével. Kétdimenziós térben ezek a következőképpen számolhatóak  $W_1$  és  $W_2$  falpontok ismeretében:

$$\vec{n} = \frac{(y_{W_2} - y_{W_1}; x_{W_1} - x_{W_2})}{\sqrt{(y_{W_2} - y_{W_1})^2 + (x_{W_1} - x_{W_2})^2}}$$

$\vec{n}$  az egyenes egységnyi normálvektora. Ebből a transzformációs mátrix:

$$T = \begin{bmatrix} 1 - 2x_n^2 & -2x_n y_n \\ -2x_n y_n & 1 - 2y_n^2 \end{bmatrix}$$

Az eltolásvektor az egyenes origótól vett távolságát írja le. A normálvektorból meghatározható az egyenes egyenlete az

$$nx = nW_1$$

megoldásával. Ennek eredménye az egyenes  $ax + by + c = 0$  formájú egyenlete, melyből meghatározható az eltolásvektor:

$$V = \left[ \frac{-ac}{a^2 + b^2}, \frac{-bc}{a^2 + b^2} \right]$$

A forrás adott falra vett tükörképe tehát

$$S' = TS + V$$

A forrás elmozdulása esetén, ha  $S_m = S + dS$ , a tükörforrás elmozdulása  $S'_m = S' + TdS$  képlettel számolható.

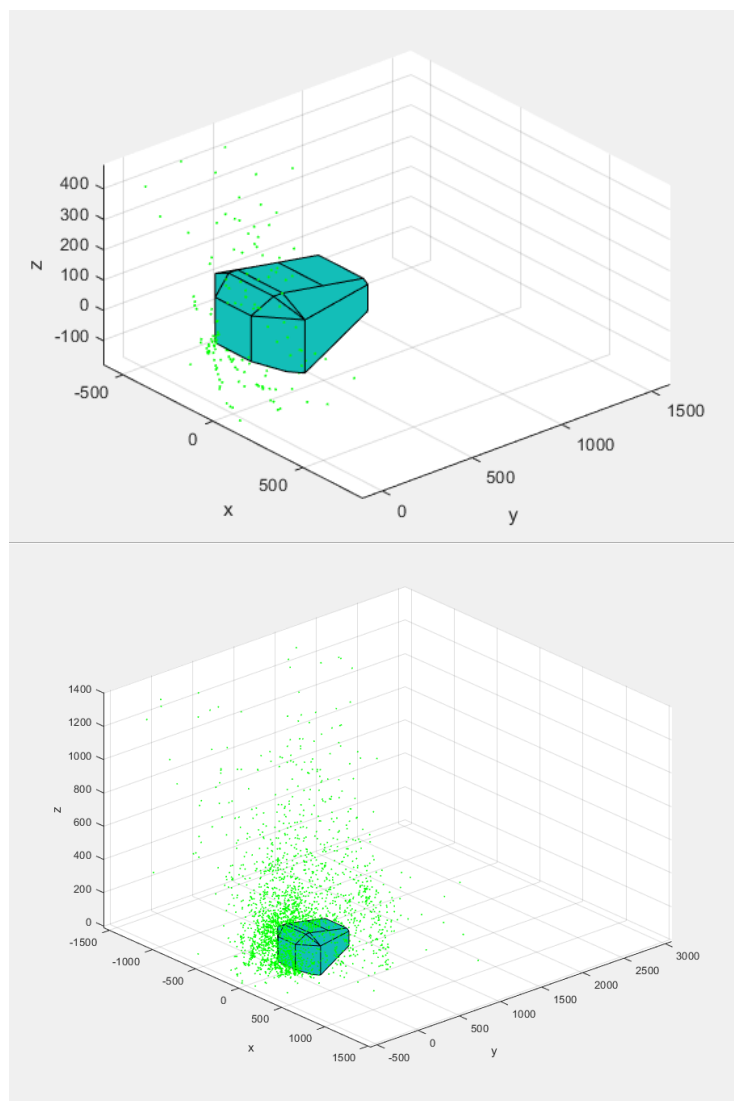
Többszörös visszaverődések a tükörforrások további tükrözésével modellezhetőek. A tükörforrások ennek megfelelően „generációkba” rendezhetőek aszerint, hogy hányadrendű visszaverődést reprezentálnak. Minél több tükörforrással reprezentálunk egy termet, annál pontosabb lesz a modell, ám a számításigény drasztikusan megnőhet.

### 4.3 Tükörforrások rendje

Könnyen belátható, hogy a tükörforrások száma a tükörforrások rendjének függvényében exponenciális, hiszen az N-edik generáció valamennyi tükörforrását tükrözzük valamennyi falra ismét az N+1-edik generáció létrehozásakor. Felső becslést a tükörforrások számára a következőképpen adhatunk [8]:

$$MS = N(N - 1)^{o-1}$$

Ahol MS a tükörforrások száma, N a falak száma, o pedig a tükörforrások rendje. Könnyen belátható, hogy ez sokadik rendű tükörforrások esetén nagy számítási kapacitást igényel, azonban az egyes források érvényességi feltételei (különösképp az amplitúdó és távolságfeltétel) egyre kevésbé teljesülnek. Ezen feltételeket a 4.4 fejezet tárgyalja.



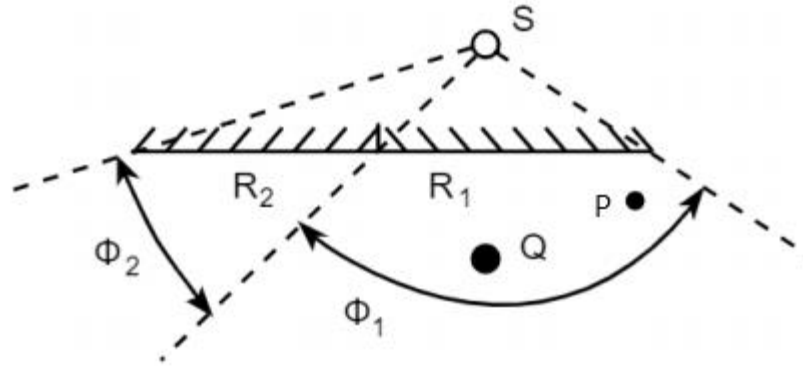
**18. ábra N=19 falú terem tükörforrás elrendezése második és harmadik generáció esetén. A tükörforrások száma nagyságrendileg 300 és 7000.**

## 4.4 Tükörforrások érvényessége

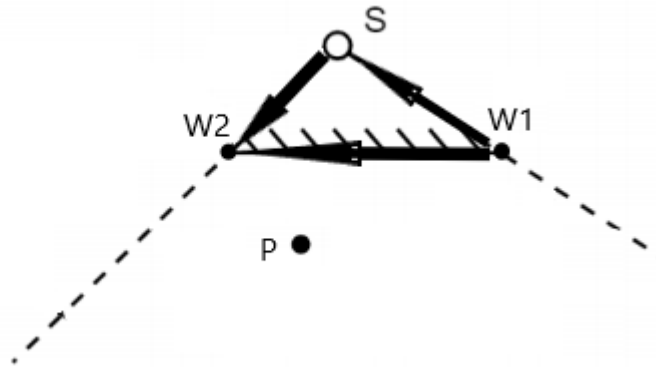
Egy létrehozott tükörforrásnak nem minden esetben van valós fizikai tartalma. Ebben az esetben a tükörforrás létezését nem vesszük figyelembe, érvénytelennek hívjuk. A tükörforrások érvényességére jól meghatározott feltételek vannak.

### 4.4.1 Láthatósági feltétel

Egy részről csak akkor kell figyelembe venni egy tükörforrás létezését, ha a reflektált hangrészecske eljut a hallgató pozíciójába. Ez abban az esetben történik meg, ha a láthatósági feltétel teljesül, azaz a hallgató pozíciója beleesik a tükörforrás és a falak csúcsain keresztül húzott félegyenesek által közrefogott térrészbe (háromdimenziós esetben a fal és a tükörforrás által kifestített végtelen gúlába) (lásd 19. ábra).



19. ábra Tükörforrás láthatósági tartományai. Q forrás S tükörforrása P hallgató számára az  $R_1$  falszakasz esetén látható,  $R_2$  falszakasz esetén nem.



20. ábra Láthatósági feltétel ellenőrzése

A láthatóság meghatározásához  $W_1$  és  $W_2$  falvégpontok,  $S$  forrás és  $P$  hallgató pozíciója szükséges. A forrás akkor látható, ha a hallgatópozíciója  $W_1 \rightarrow S$ ,  $S \rightarrow W_2$  és  $W_1 \rightarrow W_2$  vektoroktól balra található. Ezt a keresztszorzatok előjelvizsgálatával ellenőrizhetjük.

$$\text{sign}(\vec{V} \times \vec{P}) = \begin{cases} 1, & \text{ha } P \text{ a vektortól balra található} \\ 0, & \text{ha } P \text{ ráesik a vektor által meghatározott egyenesre} \\ -1, & \text{ha } P \text{ a vektortól jobbra található} \end{cases}$$

Fontos megkötés, hogy a falvégpontok megfelelő sorrendűek legyenek, azaz a terem belseje  $W_1 \rightarrow W_2$  vektortól balra helyezkedjen el.

#### 4.4.2 A tükörforrás nem eshet a terem belső terébe

Fontos megkötés, hogy tükörforrás nem eshet a terem belső terébe, ugyanis ekkor az őt létrehozó forrásra nézve nincs olyan reflexió, melyet a terem belső terébe tükrözött

forrással helyettesíthetnénk [8]. Ezt a feltételt a láthatósági feltétellel összevonva ellenőrizzük.

#### 4.4.3 Amplitúdó feltétel

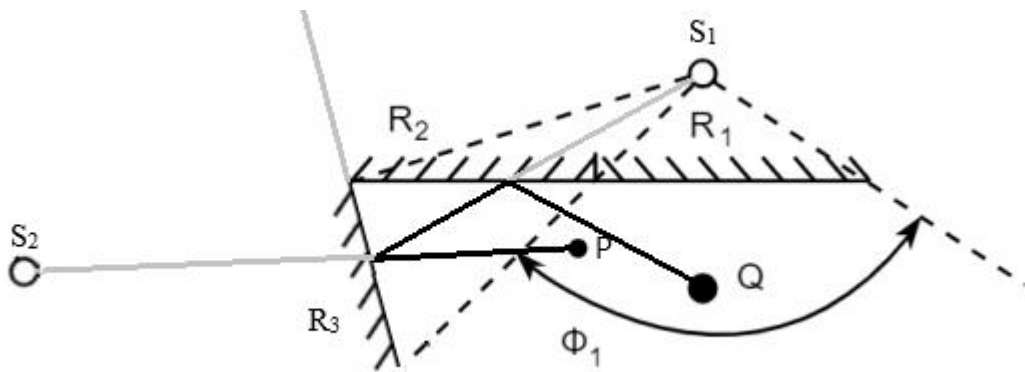
Amennyiben egy tükörforrás amplitúdója elhanyagolható mértékben kicsi, kezelhetjük érvénytelenként. Erre egy előre definiált küszöbértéket adhatunk meg, melynek értéke jellemzően  $-30\dots-60$  dB. Ezek a tükörforrások olyan visszavert hanghullámokat modelleznek, melyek már nem hallhatóak.

#### 4.4.4 Távolság feltétel

Amennyiben egy tükörforrás hallgatótól vett távolsága az általunk előírt maximális távolságnál nagyobb, szintén kezelhető érvénytelenként. Ennek fő okát a 4.5 fejezetben tárgyaljuk.

#### 4.4.5 Érvénytelen tükörforrások kezelése

Az érvénytelennek nyilvánított tükörforrásokat a hangforrás megszólaltatásakor nem szabad figyelembe venni. Azonban a következő generáció számításakor érvénytelenségüktől függetlenül figyelembe kell venni minden tükörforrást, ugyanis érvénytelen tükörforrás is létrehozhat érvényes tükörforrást a következő generációban. Ezt a 21. ábrán a láthatósági feltétellel illusztráltam.

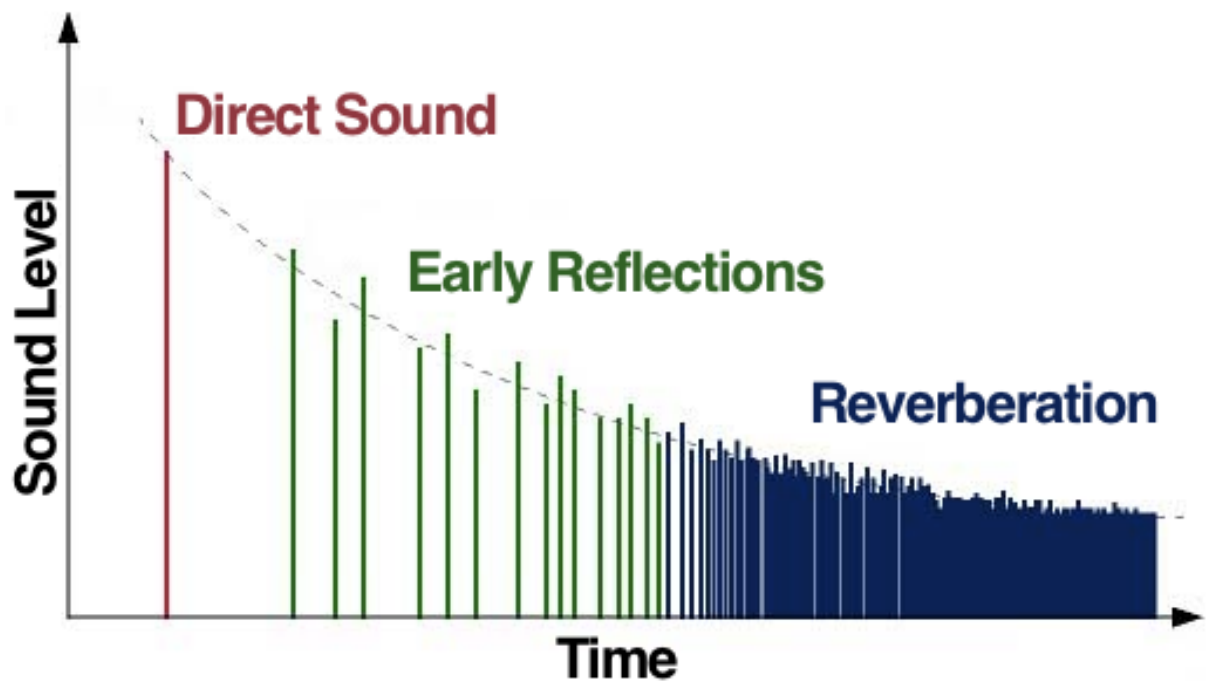


21. ábra Láthatósági feltétel többszörös reflexió esetén. P hallgató számára  $S_1$  tükörforrás  $R_2$  falszakasz esetében nem látható,  $S_1$   $R_3$  falszakaszra tükrözött képe ( $S_2$ ) viszont már látható.

### 4.5 Terem impulzusválasz

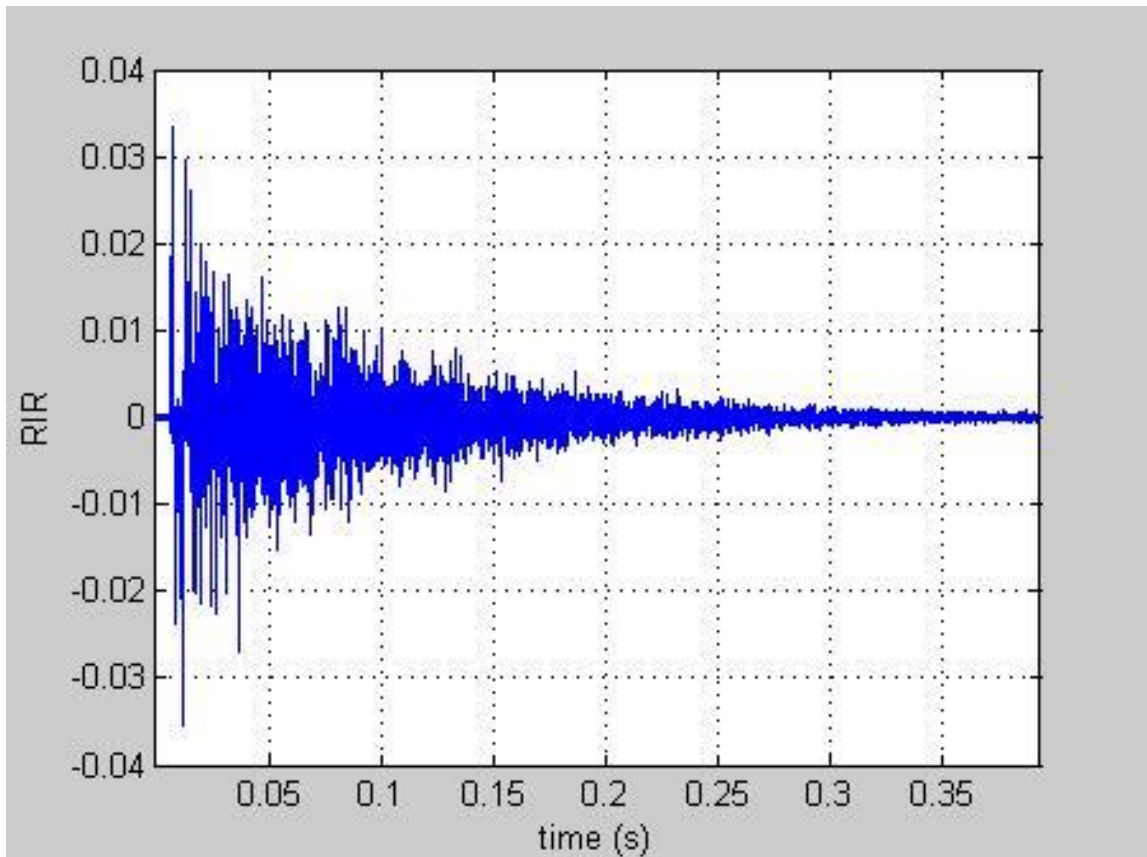
A tükörforrások módszerével meghatározható egy adott forrás, hallgató és teremelrendezés impulzusválasza is. Az impulzusválasz diszkrét Dirac impulzusok

sorozata, mely két szignifikáns szakaszból áll, a korai visszaverődések (ER – Early Reflections) szakaszából, és a tranziens lecsengő szakaszból (LR – Late Reverbation).



22. ábra Modellezett terem impulzusválasz

A teljesség kedvéért meg kell említenünk, hogy gyakorlatban a mért impulzusválasz nem tisztán diszkrét impulzusok sorozata, a pulzusok közötti érték nem zérus. Ennek oka a falvisszaverődések szűrő jellege.



23. ábra Mért terem impulzusválasz

Az ER szakaszban az impulzusválasz Dirac impulzusai jól elkülöníthetőek. A terem szubjektív hangzását főként ez határozza meg [8], mivel az impulzusok irányát még képesek vagyunk érzékelni. A tükörforrás modellben ezt a hallgatóhoz közel lévő érvényes tükörforrások reprezentálják.

Az LR szakaszban a Dirac impulzusok száma nagymértékben megnövekszik, így azokat már nem lehet elkülöníteni, az impulzusválasz egy exponenciálisan lecsengő függvényként viselkedik. A tükörforrás modellben ezt a hallgatótól távolabb eső, nagy számú tükörforrás-sokaság reprezentálja.

A két szakasz határát az impulzusválasz energiájából származtatjuk [8]. A határ ( $t_L$ ) a terem geometriai és akusztikai tulajdonságaitól függ, tipikus értéke  $193 \pm 42$  ms téglalap alakú teremre,  $158 \pm 30$  ms nem téglalap alakú teremre és  $143 \pm 34$  ms operaház esetén [9]. A tükörforrás modellben ezt az időpillanatot egy hallgatótól vett távolság reprezentálja, mely a hang terjedési sebességétől függ.  $t_L = 250$  ms és  $c = 340 \frac{m}{s}$  esetén például ez a távolság

$$r = t_L \cdot c = 0,25s \cdot 340 \frac{m}{s} = 85 m$$

Látható, hogy ez egy átlagos terem méreteivel nagyságrendileg megegyezik. Ez azt jelenti, hogy a terem szubjektív hangzását legnagyobb mértékben befolyásoló tükörforrások száma nem nagy, a legtöbb tükörforrás csak az LR szakaszt reprezentálja, melynek nincs megkülönböztethető irányinformációja a hallgató számára. Ezt kihasználva előállíthatjuk a terem szubjektív hangérzetét az ER szakaszt definiáló alacsony számú tükörforrással és megfelelő zengetéssel.



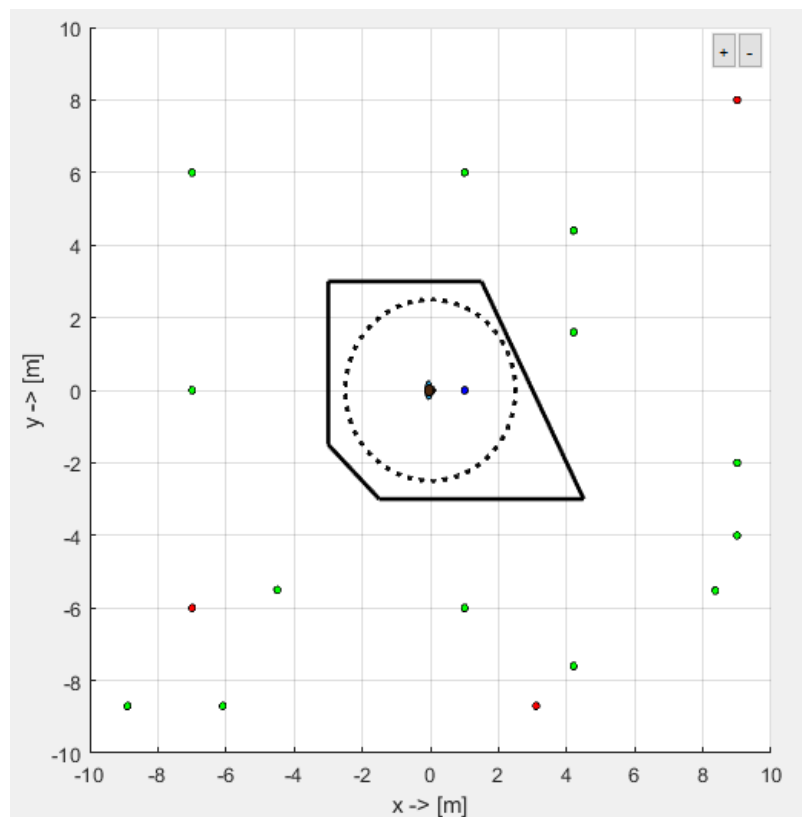
## 5 A hangtér-reprodukciót megvalósító szoftver felépítése és működése

Ebben a fejezetben az elkészített program tulajdonságait részletezem. A program Matlab®-ban készült objektum-orientáltan, a SOFA keretrendszer [11] felhasználásával. Fejlesztéshez RAZOR 9DOF IMU version SEN-107736 típusú 9 szabadsági fokú giroszkópot, és az ehhez írt keretrendszert [10] használtam.

### 5.1 A program működése

A program bemenete egy falaival és azok reflexiós tényezőivel definiált terem, a benne található hangforrás pozíciója és orientációja, a vevő pozíciója és orientációja, valamint a későbbi számítások szempontjából fontos paraméterek.

Első lépésként a program elkészíti a tükörforrások módszerének segítségével a tükörforrás-elrendezést, és megvizsgálja a tükörforrások érvényességét.

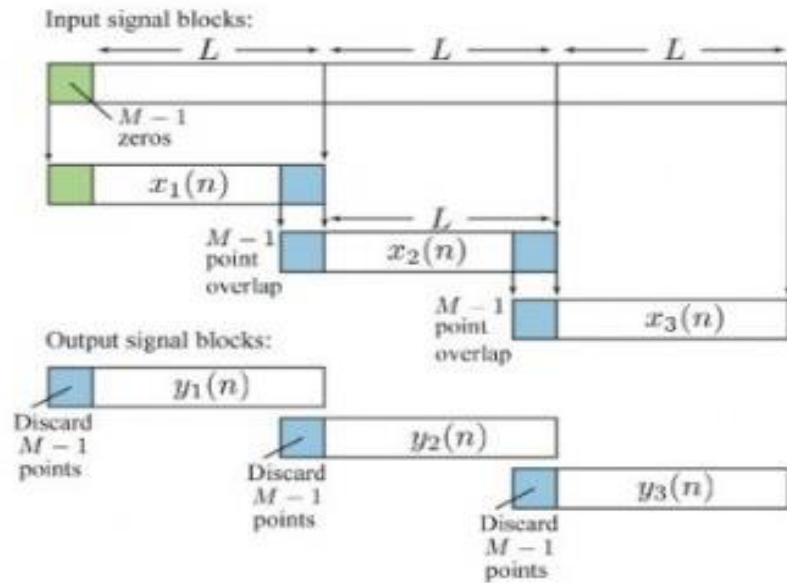


24. ábra A program felhasználói felülete. Az érvénytelen tükörforrások színe piros, az érvényes tükörforrások színe zöld.

Mivel várhatóan nagy (és a terem geometriájától erősen függő, ezért előre ismeretlen) számú tükörforrás HRTF szűrését kell végeznünk, a kapacitásigény változékony lehet. Megbízhatóbb megoldás, ha a hallgató pozíciója körül adott sugarú körben virtuális pontforrás-sokaságot hozunk létre (lásd 24. ábra), melyekben megfelelő módon (WFS módszer segítségével) összegezzük a tükörforrások jeleit, és csak ezen virtuális forrásokat szólaltatjuk meg. Ezek a binaurális források. Segítségükkel állandó, előre ismert számú forrás HRTF szűrését kell csupán elvégeznünk. A tükörforrások számának növelésével csak a binaurális forrásokban összegzett jelek száma növekszik, ezen összegzés azonban nem költséges művelet a szűréshez képest.

A binaurális források jeleinek szűrését valós idejű konvolúcióval valósítjuk meg. A SOFA (Spatially Oriented Format For Acoustics) toolbox tartalmazza ehhez a megfelelő HRTF szűrőkészletet, és az ezek kezelésére szolgáló függvényeket. Ennek segítségével határozzuk meg a HRTF szűrő impulzusválaszát az irány függvényében. Ezt az impulzusválaszt konvolváljuk valós időben valamennyi binaurális forrás esetén, és az így kapott válaszokat összegezve állítjuk elő a hallgató jobb és bal fülére meghatározott időtartománybeli jelet, melyet a fejhallgatóval megszólaltatunk.

Jelek valós idejű diszkrét konvolúciója véges impulzusválasz esetén lehetséges (véges számítási kapacitással). A bejövő jelet  $L$  hosszúságú mintákra osztjuk, a minták és az impulzusválasz konvolúcióját  $L+M-1$  hosszan számoljuk ki, így a kapott válasz hossza is  $L+M-1$ . A válaszok  $M-1$  minta hosszan átlapolódnak, az OLS (Overlap-Save) metódus ennek megoldására az időben későbbi válasz első  $M-1$  mintáját figyelmen kívül hagyja.



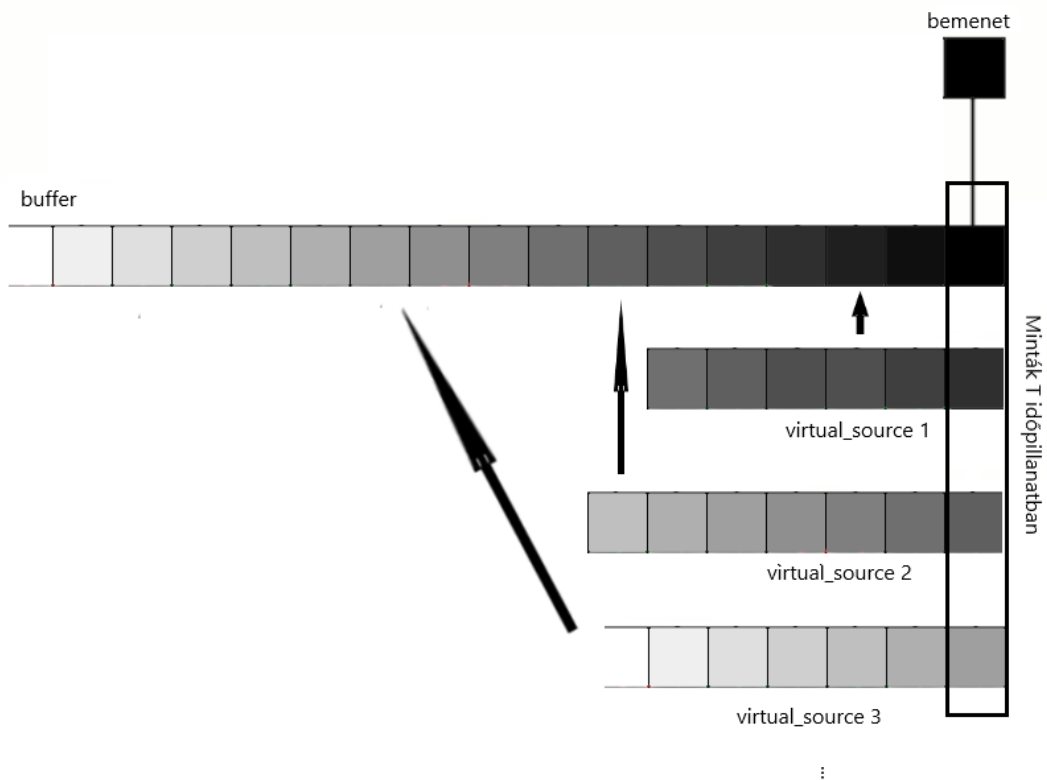
25. ábra OLS convolver működése

A kovolúció eredménye  $kL + M \leq n \leq kL + L + M - 1$  szakaszban a következő képlettel számolható:

$$y[n] = \sum_{m=1}^M h[m] \cdot x_k[n - kL - m]$$

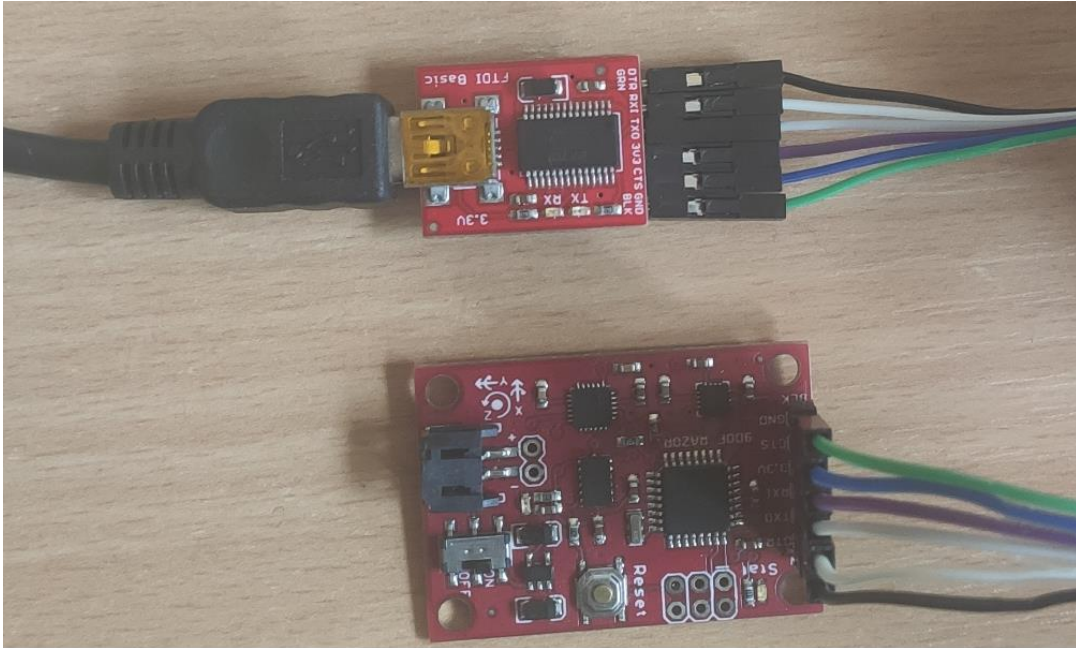
$h[n]$  az impulzusválasz,  $x_k[n]$  a bejövő jel.

A számítási kapacitás csökkentésére célszerű késleltető buffert használni. Mivel a tükörforrások és a zengő forrás jele pusztán időbeli késleltetésben tér el, ezért a zengő forrás jelét eltároljuk egy bufferben, melyből a megfelelő helyen (azaz megfelelő késleltetéssel) kiolvasott jel a virtuális források jele. Ez azért praktikus, mert ennek hiányában minden egyes virtuális forráshoz kellene, hogy tartozzon egy buffer, amennyiben kezeljük a zengő forrás elmozdulását is.



**26. ábra Buffer felépítése**

A valós idejű fejkövetés megvalósítására egy 9 szabadsági fokú giroszkópot használtam. A giroszkóp a fejhallgató valamely részéhez rögzítve méri a fej irányát. Az eszköz része egy mikroprocesszor is, mely a mért értékek előszűrését végzi el, és az ezekből előállított aktuális irányvektor koordinátáit küldi fokban, yaw/pitch/roll sorrendben (az általam használt beállítások mellett). A giroszkóppal soros porton keresztül lehet kommunikálni.



27. ábra RAZOR 9DOF IMU gyroszkóp

```

COM3
#YPR=-7.31,-41.54,-1.59
#YPR=-7.50,-41.43,-1.36
#YPR=-7.22,-41.37,-1.76
#YPR=-7.32,-41.33,-1.58
#YPR=-7.27,-41.46,-1.77
#YPR=-7.29,-41.47,-1.73
#YPR=-7.25,-41.48,-1.70
#YPR=-7.21,-41.39,-1.83
#YPR=-7.15,-41.13,-1.90
#YPR=-7.13,-41.49,-1.96
#YPR=-7.32,-41.48,-1.70
#YPR=-7.44,-41.70,-1.54
#YPR=-7.20,-41.59,-1.87
#YPR=-7.27,-41.40,-1.78
#YPR=-7.30,-41.44,-1.72
#YPR=-7.46,-41.47,-1.54
#YPR=-7.40,-41.32,-1.58
#YPR=-7.39,-41.38,-1.62
#YPR=-7.46,-41.35,-1.51
#YPR=-7.47,-41.47,-1.46
#YPR=-7.38,-41.26,-1.54
#YPR=-7.32,-41.35,-1.59
#YPR=-7.19,-41.19,-1.74
#YPR=-7.21,-41.31,-1.69
#YPR=-7.24,-41.38,-1.67
#YPR=-7.40,-41.64,-1.38
#YPR=-7.31,-41.63,-1.51
#YPR=-7.36,-41.34,-1.42
#YPR=-7.31,-41.18,-1.52
#YPR=-7.59,-41.22,-1.16
#YPR=-7.31,-41.19,-1.50
#YPR=-7.37,-41.24,-1.42
#YPR=-7.06,-41.27,-1.80
#YPR=-7.20,-41.27,-1.60
#YPR=-7.22,-41.27,-1.62
#YPR=-7.23,-41.43,-1.62
#YPR=-7.34,-41.51,-1.49
#YPR=-7.27,-41.49,-1.56
#YPR=-7.36,-41.26,-1.46
#YPR=-7.37,-41.36,-1.40

```

18. ábra A gyroszkóp által küldött nyers adatok text formátumban

A giroszkóp 100ms-onként küld irányadatot  $\pm 180^\circ$  tartományban text formátumban, 2 tizedesjegy pontossággal. Ilyen felbontás nem szükséges a lokalizáció szempontjából, így az értékeket a feldolgozás során egészre kerekítettem. Ez segített az olvasott értékek szórásának csökkentésében is.

## 5.2 Fontosabb programozási feladatok, osztályok és funkcióik

### 5.2.1 Terem

A vizsgált terem (`room` osztály) a tükröforrások módszere szempontjából fontos tulajdonságaival van reprezentálva. Ezek a falainak sorszáma, normálvektora, végpontjai, impedanciája (melyből származtatható a reflexió tényezője), illetve a tükrözést és az elmozduló forrás tükröforrás-elrendezésének meghatározását gyorsító transzformációs mátrix és eltolásvektor.

A tükrözés művelete leírható a transzformációs mátrixszal való szorzással és az eltolásvektor hozzáadásával, a tükrözendő forrás elmozdulása esetén pedig elegendő a tükröforrást elmozdítani az eredeti forrás elmozdulásvektorának tükröképével (ami az eltolásvektor és a transzformációs mátrix szorzata).

A `room` osztály a falak listáját, valamint a tükröforrás-elrendezés létrehozását és frissítését végző függvényeket tartalmazza.

### 5.2.2 Zengő forrás

A teremben elhelyezett hangforrást a zengő forrás (`reverberant_source`) osztályban tároljuk. Ez rendelkezik sorszámmal, bemenő jellel, pozícióval, orientációval és hozzá tartozó tükröforrásokkal. A tükröforrások virtuális forrás (`virtual_source`) objektumok. A zengő forrás elmozdulása esetén az erre létrehozott függvény képes frissíteni a hozzá tartozó tükröforrás-elrendezést.

### 5.2.3 Hallgató

A hallgató jellemző tulajdonságai a pozíció és orientáció, melyet a `listener` osztályban tárolunk. A hallgató orientációját változtathatjuk a giroszkóppal a fejkövetés során.

## 5.2.4 Hangtér

A teljes hangtér valamennyi jellemzőjét a `sound_scene` osztály tartalmazza. Elemei a terem (`room`), a zengő forrás (`reverberant_source`), binaurális források (`binaural_sources`), a vevő (`receiver`), a környezet tulajdonságait tartalmazó osztály (`environment`), és a renderelést végző `scene_renderer` osztály egy példánya.

A `sound_scene` osztály fontos feladata a tükörforrások validálása is, melyre külön függvényt írtam.

## 5.2.5 OLS convolver

Az osztály a binaurális források jelét és a hozzájuk tartozó HRTF szűrő impulzusválaszát konvolválja OLS módszerrel, így számítva a binaurális források kimeneti jelét időtartományban.

## 5.2.6 Késleltető buffer

A `delay_line` osztály feladata a zengő forrás jelének bufferelése. A jelet időtartománybeli és frekvenciatartománybeli mintáival is képes tárolni. A buffer valamennyi értékéhez hozzáférnek a virtuális források, ezek jele a bufferből megfelelő késleltetéssel kiolvasott jel.

## 5.2.7 Handles struktúra

A `handles` egy felhasználói adatokat tömörítő struktúra. Tartalmaz minden működéshez szükséges információt és beállítást, mint például a hangforrás jelét, a használt teremmodellt, a választott HRTF szűrőt, a tükörforrások maximális rendjét, a binaurális források és a renderer tulajdonságait. Ezen kívül a felhasználói felület nyújtotta funkciókat is kezeli.

## 5.2.8 Giroszkóp

A giroszkóp kezelésére létrehoztam egy `gyroscope` osztályt. Ez soros port segítségével kapcsolatot épít fel a giroszkóp és a szoftver között, fogadja és buffereli az érkező irányinformációkat. A beérkező adatokat text formátumból lebegőpontos számokká alakítja, melyeket egészen kerekít. Az objektum létrehozásakor a giroszkóp aktuális orientációját offsetként kezeli, melyet kivon minden olvasott értékből, így a 0°-os szöghöz tartozó irány az az irány, mely felé a giroszkóp az objektum létrehozása során

mutat. Az offsetet igény esetén lehet frissíteni. Az offset kivonását végző függvény túlsordulás elleni védelemmel is rendelkezik.

A soros port olvasása a matlab beépített `serialport(...)` és `read(...)` függvényei segítségével történik.

```
>> gyrol=gyroscope("COM3", 57600)
-5.6300 -21.3300  3.3500

  0   -1    0
 -1   -1    0
 -1   -1    0
 -1   -1    0
 -1   -1    0
 -1   -1    0
 -1   -1    0
 -1   -1    0
 -1   -1    0
 -1   -1    0
 -2   -1    0
 -2   -1    0
 -2   -1    0
 -2   -1    0
 -2   -1    0
 -2   -1    0
 -2   -1    0
 -2   -1    0
 -2   -1    0
 -2   -1    0
```

29. ábra Giroszkóp feldolgozott adatai. Az első leolvasott adat az offset.

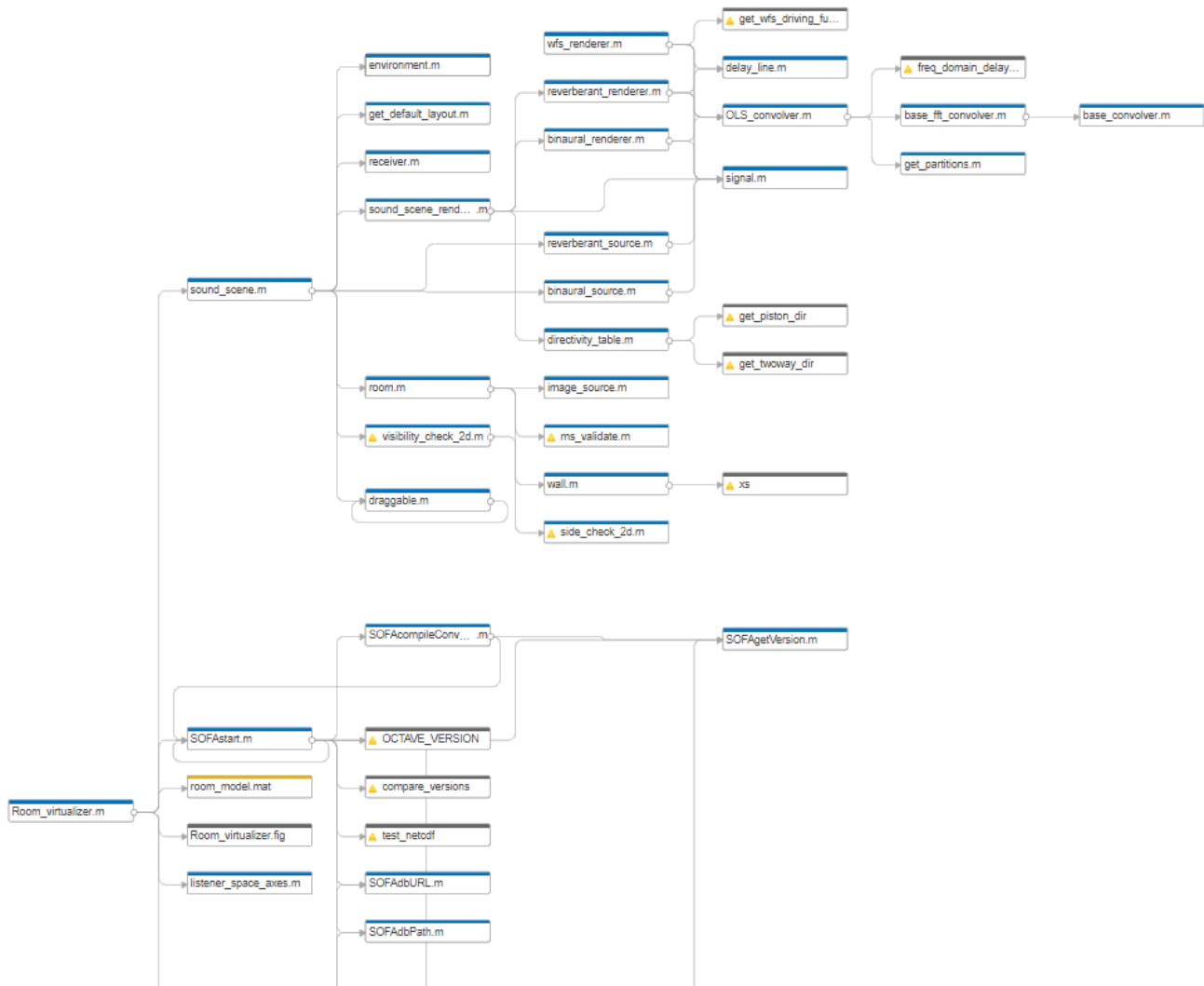


```
-1 -1 0
-1 -1 0
-1 -1 0
-1 -1 0
-1 -1 0
-1 -1 0
-1 -1 0
-1 -1 0
-1 -1 0
-1 -1 0
-1 -1 0
-1 -1 0
-1 -1 0
-1 -1 0
-1 -1 0
-1 -1 0
-1 -1 0
-1 -1 0
-1 -1 0
-1 -1 0
```

**30. ábra Nyugalomban lévő giroszkóp beolvasott adatai. Az értékek jól láthatóan stabilak, az olvasott irányadatok szórása kicsi.**

### 5.3 A kód osztálydiagramja

Az osztálydiagramot a Matlab® ClassViewer segítségével készítettem el.



31. ábra A program osztálydiagramja

Az osztálydiagram folytatása a kép alján a SOFA toolbox további elemeit tartalmazza, így számunkra nem releváns.

Az osztálydiagramról leolvashatóak a főbb osztályok egymáshoz való relációi.

## 5.4 A program használata során tapasztaltak

A gíroszkóp egyszeri irányadat olvasásakor esetenként nem megbízható adatot küld, folytonos olvasás esetén azonban ez a probléma rendszerint megoldódik. Oka a gíroszkóp gyártója által készített keretrendszerben lehet. Ez a hiba szerencsére rendszerint nem befolyásolja nagyban a program működését, ugyanis fejkövetés közben az irányadatok beolvasása folytonos.

Egy átlagos számítási kapacitású számítógép egyszerű 5 falú kétdimenziós teremmodell tükörforrásait  $N=3$  generációig képes a hangminőség romlása nélkül kezelni.

A program a tükörforrás-elrendezés módosítását és validálását ebben a nagyságrendben gyorsan képes kezelni, ebből adódó hibát nem tapasztaltam. A tükörforrások érvényessége a felhasználói felületen valós időben jelenik meg.

A program által reprodukált irányérzet megfelelő, változása a giroszkóp elmozdulásának hatására megfelelően érzékelhető.

## 6 Összegzés

Az emberi irányhallás legfontosabb lokalizációs jellemzőinek megfelelő reprodukciójához szükség van a hangtér fázis- és amplitúdóviszonyainak reprodukciójára. Emiatt a hagyományos VBAP megoldások helyett WFS módszert kell alkalmaznunk.

A hangszóó alapú hangtérreprodukcióval szemben előnyösebb körülményeket biztosít a fejhallgató alapú reprodukció. A binauralizáció módszere hatékony megoldást nyújt a dobhártyán mérhető jelek reprodukciójára a hangforrás irányának függvényében.

A zengő terek modellezésére egyszerű módszer a tükörforrások módszere. Ez a termet és az abban elhelyezett vevőt azok geometriájának függvényében egy pontforrásokkal modellezi, melyek közül legfőképpen az ER szakaszban hallhatóak irányiformációja lényeges.

A tükörforrás-elrendezés létrehozását és binauralizálását végző szoftver számításigényének csökkentésére számos egyszerűsítő megoldást kellett alkalmaznunk, ilyenek a binaurális források és a késleltető buffer. A kimeneti jel meghatározására a program realtime konvolúciót valósít meg.

A tapasztalatok alapján a program számítási igénye nagy tükörforrás-szám esetén okozhat hangminőségbeli problémákat. Ezen kívül a fejkövetésre használt giroszkóp megbízhatatlan működése is okozhat problémákat.

Normál működés esetén a program megfelelő minőségű hangérzetet nyújt.

## Irodalomjegyzék

- [1] Damjanovich Sándor, Fidy Judit, Szöllősi János: Orvosi biofizika (2007, Medicina Könyvkiadó)
- [2] Bosun Xie: Head-related Transfer Function and Virtual Auditory Display, second edition, 2013, J. Ross publishing, ISBN-13: 978-1-60427-070-9
- [3] BME VIHIMA12 Hangtechnika c. tárgy Dr Márki Ferenc által lektorált hallgatói jegyzete
- [4] Csepreghy Márton: Sokcsatornás Hangtér-reprodukciós Rendszer Tervezése és Megvalósítása, szakdolgozat, BME, 2019
- [5] Wightman F.L., and Kistler D.J. (1997). “Monaural sound localization revisited,” J. Acoust. Soc. Am. 101(2), 1050-1063.
- [6] Shaw E.A.G, and Teranishi R. (1968). “Sound pressure generated in an external-ear replica and real human ears by nearby point source,” J. Acoust. Soc. Am. 44(1), 240-249.
- [7] Zahorik P., Brungart D.S., and Bronkhorst A.W. (2005). “Auditory distance perception in humans: a summary of past and present research,” Acta Acustica United with Acustica 91(3), 409–420.
- [8] Improved Mirror Source Method in Room Acoustics, F. P. Mechel, 2001, Journal of Sound and Vibration, 256(5), 873-940
- [9] A new definition of boundary point between early reflections and late reverberation in room impulse responses, Takayuki Hidaka, Yoshinari Yamada, Takehiko Nakagawa, 2007, Takenaka R&D Institute, 1-5-1, Otsuka, Inzai, Chiba 270-1395, Japan
- [10] [https://github.com/Razor-AHRS/razor-9dof-ahrs/tree/master/Arduino/Razor\\_AHRS](https://github.com/Razor-AHRS/razor-9dof-ahrs/tree/master/Arduino/Razor_AHRS)
- [11] <http://www.sofacoustics.org/data>
- [12] SPATIAL SOUND GENERATION AND PERCEPTION BY AMPLITUDE PANNING TECHNIQUES, Ville Pulkki, Helsinki University of Technology Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing, 2001, ISBN 951- 22-5531-6