

# Virtuális hangtér-szimuláció és a binaurális technológia

WERSÉNYI GYÖRGY

Széchenyi István Egyetem, Győr  
wersenyi@sze.hu

Lektorált

**Kulcsszavak:** virtuális valóság, lokalizáció, hangtér szimuláció, binaurális hallás

A virtuális valóság szimulátor gyűjtőnév alatt megtaláljuk a látvány, a hangélmény, sőt a tapintás szimulációját is modern rendszerek esetében. Ennek részeként a hangtér létrehozása fejhallgatón keresztül történik és célja az autentikus hangtér-leképezés. Hangforrásokat hozunk létre, irányinformációval látjuk el őket és olyan akusztikus környezetet igyekszünk megvalósítani, amely a lehető legjobban hasonlít a valóságra. A legfontosabb paraméter ebben a hangforrások helyének meghatározhatósága, a lokalizáció, az irányinformáció pontos átvitele. A binaurális, kétfülű hallás alapvető működése, leírása, a műszaki paraméterek definíciója és mérése alapvető feladat. Ez a cikk bemutatja az ide vonatkozó fogalmakat, mérési eljárásokat, a szimuláció lényegi lépéseit és korlátait, elsősorban a fejhallgató lejátszás szemszögéből.

## 1. Bevezetés

A binaurális technika magába foglalja azokat a hangfelvételi, lejátszási, és szintetizálási technikákat, ahol a kérdéses jel a dobhártyán fellépő akusztikus jel. Ha ezeket megfelelő pontossággal elő tudjuk állítani a hallgató dobhártyáján, autentikus hangélményben lesz része. Azaz, ha képesek vagyunk reprodukálni azt a hangnyomás időfüggvényt a dobhártyákon, melyek egy adott hangtérben keletkeztek egy korábbi felvétel során, akkor tökéletesen át tudjuk vinni az akusztikai információt. Ennek legfontosabb része az irányinformáció, azaz a hangforrások helyének meghatározhatósága, melyet lokalizációnak hívunk.

Mindez csak elméleti felvetés, hiszen a fülek jeleinek ilyen reprodukálása nehéz, gyakorlatban szinte lehetetlen. Az elméletet nevezhetjük kétfülű hallásnak is, hiszen a fülek kétcsatornás bementét tekinti hasznos jelnek, melyet mérni, illetve reprodukálni kell tudni. A felvételeket a hallgató fülében kell végezni, elméletileg a dobhártyán, gyakorlatban a hallójárat bementén. Lejátszáskor számítógép által generált hangforrást kell „elhelyeznünk” egy virtuális térben, mesterségesen létrehozva az átviteli utat a dobhártyáig. A binaurális technológia olyan módszerek összefoglaló neve, mely magába foglalja az akusztikus bemenő jelek gyakorlati kezelését mindkét fül számára, mint például a felvétel, szintézis, feldolgozás, kisugárzás és kiértékelés.

Ez a cikk röviden bemutatja az emberi térhallás és irányérzékelés alapjait, a leíró átviteli függvények értelmezését és használatát, különös tekintettel azok mérési nehézségeire. Bemutatja a kapcsolatot a mérhető átviteli függvények és a helymeghatározhatóság között. A következő fejezet a binaurális szintézis lépéseit tárgyalja: felvételi lehetőségek műfejjel, illetve igazi emberekkel, a rögzített adatok feldolgozása és fejhallgatón történő lejátszása. Utóbbi problematikája külön fejezetben kerül összefoglalásra. Végül az összefoglalásban néhány alkalmazásra hívjuk fel a figyelmet.

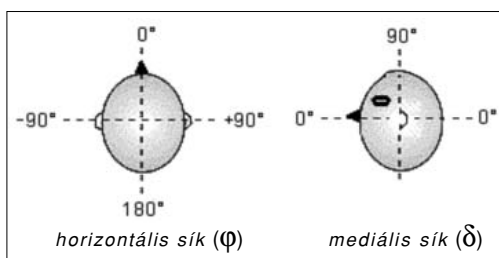
## 2. Az emberi térhallás és lokalizáció

### 2.1. A leíró függvények

A hallásfolyamatban részt vesz a külső fül, a középfül, a belső fül és az agy [1,2]. A külső fül a dobhártyáig tart, a beérkező akusztikai hullám mechanikai rezgésbe hozza azt. A középfülben ez a mechanikai rezgés terjed a hallócsontokon át a csigáig. A belső fülben a csigában található folyadék és a baziláris membrán rezgései végzik a frekvenciatranszformációt és az idegi impulzusok előállítását az agy számára. A térbeli hallás számára a külső fül vizsgálata a legfontosabb [3-5].

A külső fül műszaki leírása, mérnöki megragadása annak átviteli függvényével történik. A komplex átviteli függvényt HRTF-nek rövidítjük (*Head-Related Transfer Function*), mely leírja az átvitelt a szabadtér bármely pontjától a dobhártyáig, a beesési iránytól függően [6-9]. Így minden térirányhoz más HRTF tartozik. Ez a szűrőhatás határozza meg lényegében az irányinformációt. Mivel a HRTF komplex, létezik amplitúdó- és fázismenete is, sőt, gyakran az időtartományban értelmezett változatát használjuk. Ennek neve HRIR (*Head-Related Impulse Response*), ami az impulzusválasz [10].

Az átviteli függvényeket, mivel irányfüggők, speciális, fejhez rögzített koordináta-rendszerben értelmezzük [11]. Origója a fej közepében található és az egyes függvényeket gömbi koordinátákkal ( $r$ ,  $\varphi$ ,  $\delta$ ) paraméterezzük. Az oldalirányú kitérést a horizontális síkban  $\varphi$ -vel jelöljük, neve azimút. A függőleges kitérést a mediális síkban  $\delta$ -val jelöljük, neve emelkedés vagy eleváció (1. ábra).



1. ábra

A fejhez rögzített koordináta rendszer

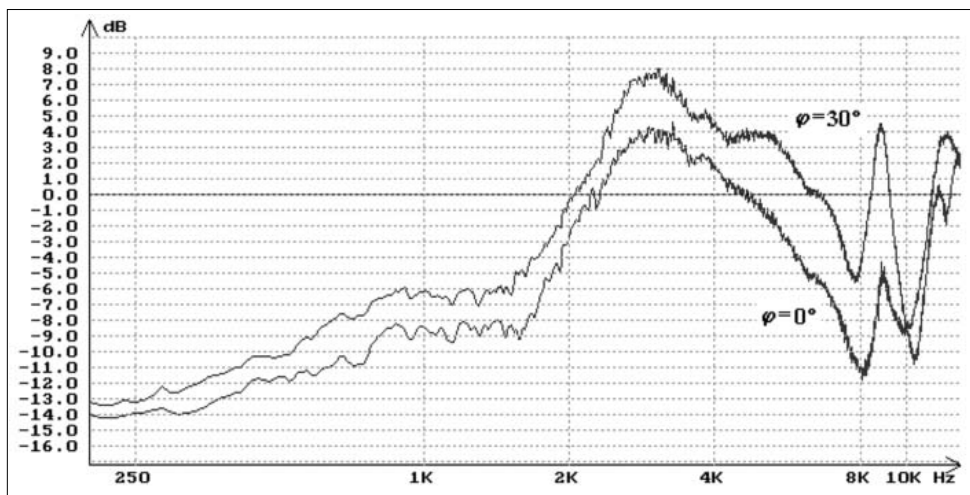
A távolságinformáció, mint harmadik paraméter általában nem szerepel, mert egyrészt gyakran állandó távolsággal dolgozunk (a fej körül gömbfelületet vagy kört elképzelve), másrészt a távolsághallás szinte kizárólag a hangerősség függvénye. A HRTF függvények tehát egy készletet alkotnak; minden térirányhoz léteznek egy-egy a bal és a jobb fülhöz is. Ez a szűrőhatás tartalmazza elsősorban a fülkagyló (alak, méret, szög), másrészt a fej (méret, orr, alak stb.) és a felsőtest geometriájának hatását, beleértve az akusztikus környezetet is (visszaverődések, teremméret stb.) [12-14]. Éppen ezért, hacsak nem hangsúlyozzuk az ellenkezőjét, a HRTF függvényeket a szabadtérben (free-field) értelmezzük, amikor nincsenek visszaverődések (süketszobai mérések).

A 2. ábra horizontális síkban mért HRTF függvényeket mutat. Ilyen értelemben a hallás szétbontható irányhallásra és távolsághallásra, amelyből mi az előbbire fókuszálunk.

### 2.2. Helymeghatározás

A lokalizáció annyit jelent, hogy képesek vagyunk a hangforrások helyzetét hozzánk viszonyítva (a fejhez rögzített koordináta rendszerben) meghatározni. Ez csak véges pontossággal lehetséges, így az úgynevezett lokalizációs bizonytalanság meghatározása az elsődleges cél. Ez nagyban függ a jel és a környezet paramétereitől és általában a helyes iránytól való eltérés fokában adjuk meg [16-18].

Az irányérzékelés két legfontosabb paramétere a füljelek közötti (interaurális) szint- és időeltérések. Amelyik fülben hangosabb és/vagy előbb érkezik be a jel, azt közelebbinek fogjuk érzékelni. Ez a folyamat nyilvánvalóan megjelenik a két fül impulzusválaszában és a frekvenciatartománybeli képen is (3. ábra).

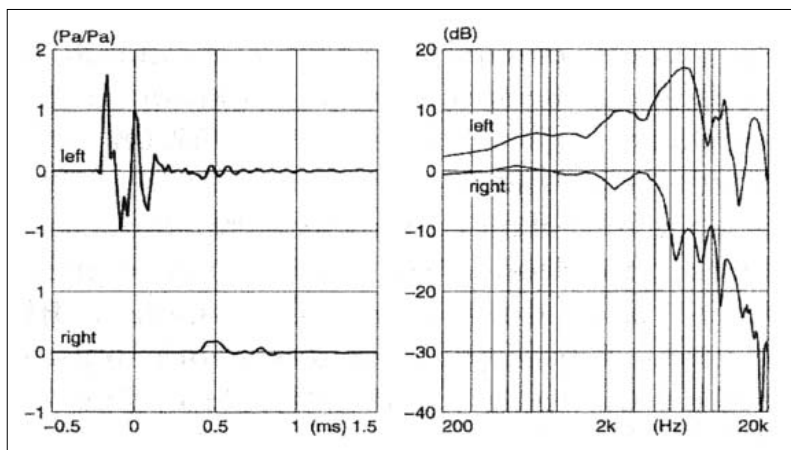


2. ábra HRTF függvények a horizontális síkból a bal fül dobhártyájának helyén mérve (Brüel Kjaer 4128 műfej) [15]

A hallás lehető legjobb felbontóképessége a szemben irányban található. Mivel a vízszintes (horizontális) síkban a füljelek idő- és szinteltérése nagy lehet, itt 3-5 fok körüli a bizonytalanság mértéke. Mivel a fej szimmetriásíkjában (mediális) a két fülbe azonos időben és erősséggel érkezik a jel, a lokalizáció nehezebb. Itt csak a HRTF függvények szűrőhatása érvényesül és nagyságrendekkel rosszabb az eredmény: 10-25 fok is lehet a hiba [1,20]. Ráadásul, gyakran előfordul, hogy ebben a síkban található forrásokat összekeverünk, és nem tudjuk eldönteni előlről vagy hátulról érkeznek-e. Ez az úgynevezett elől-hátul döntési hiba.

Az interaurális és binaurális kifejezéseknek létezik ellentéte is: a monaurális hallás és feldolgozás. Ezt magyarul egyfülűnek is nevezhetjük. Olyan paraméterek tartoznak ide, melyeket egy füllel, egy csatornán is fel tudunk dolgozni. Ilyen például a hangerősség vagy az egyik fül HRTF függvénye, amely önmagában is képes némi irányinformációt szolgáltatni.

Jegyezzük meg még meg, hogy a hangforrások helyének meghatározása abszolút és relatív is történhet. Abszolút vizsgálatnál a kísérleti alanyra rá kell mutatnia a hangforrásra, illetve az érzékelt irányra, míg relatív vizsgálatnál két hangforrás irányát kell összehasonlítani egymással, hogy az azonos-e vagy eltérő. Utóbbi könnyebb feladat, ezért az eredmények is jobbak [21-23].



3. ábra

A külső fül rendszerleíró függvényei. Balra az impulzusválasz (HRIR), jobbra az abból számított átviteli függvény (HRTF) a bal és a jobb fülhöz, élő ember blokkolt hallójáratának bejáratán mérve „bal” ( $\varphi = -90^\circ$ ) irányból [19].

Különösen lényeges a fejárnyék hatása. Egy a bal fül tengelyébe eső ( $-90^\circ$ ) forrás esetén a bal fülbe akadálytalanul terjed a hang, míg a jobb fül teljesen a fejárnyékban van. A jobb fül jele amplitúdóban is lényegesen kisebb, hiszen csak másodlagos utakon érkezik be a hang, visszaverődések és elhajlások során (ld. 3. ábra). Ennek a fülnek a jele sokkal zajszűrőbb és körülbelül 3 kHz felett szinte alig szállít értékelhető akusztikai információt [19,24]. A fej és egyéb tárgyak árnyékoló hatása az egyik legrosszabb, ami a fület érő akusztikai jellel történhet! Éppen ezért oly jelentős a kétfülű hallás: míg az egyik fül alig képes információhoz jutni, a másik a lehető legtöbbet próbálja kinyerni. A fejárnyék tehát aluláteresztő hatású. A HRTF, illetve a HRIR függvények tartalmazzák ezeket az időbeni és szintbeli hatásokat.

### 2.3. HRTF mérés

Mivel a HRTF definíciója feltételezi a síkhullámú terjedést és beérkezést a fülbe minden frekvencián, a valóságban a mérések hibát fognak tartalmazni. A süket-szobában véges távolságra, néhány méterre van a mérendő személy a forrástól, így a gömbhullámok csak részben tudnak kisimulni. A süket-szoba önmagában is csak közelíti a szabad hangteret, különösen alacsony frekvencián. Szék, állvány stb. szintén okoz visszaverődéseket, melyek részben kiküszöbölhetők, például a mért HRIR függvény ablakolásával és időbeli csonkolásával. Lehetőleg minél kevesebb ilyen szerkezetet alkalmazunk és azokat is érdemes hangelnyelő anyaggal borítani.

A mérés során referenciamérést végzünk, így a felhasznált hangszóró, erősítők, sőt a süket-szoba fent említett eszközeinek hatása eliminálható [11]. Műfejes mérés tipikus elrendezése, amikor a műfejet egy vezérelhető forgóasztalra helyezük, mely adott fokkal forgatható. Ehhez képest egy rögzített, de állítható emelkedésű hangszórót helyezünk el. Kezdetben a referenciajelet kell megmérni. Ekkor egy irányfüggetlen mikrofont helyezünk a forgóasztalra, melynek membránja a műfej fejének közepével megegyező magasságban (a képzületbeli origóban) található. A megmért jel spektrumát, mint referencia spektrum tároljuk. Ezután lecserélvén a mikrofont a műfejre, ugyanolyan környezeti paraméterek, beállítások mellett megismételjük a mérést.

Az így mért átviteli függvény és a referencia spektrum komplex hányadosa pontosan a HRTF függvény adja. Az ugyanis nem más, mint a műfej – ami egy speciális iránykarakteristikával rendelkező kétcsatornás mikrofonrendszer – átviteli függvénye az irányfüggetlen mikrofonhoz képest. A műfej – és vele együtt az emberi test is melyet modellez – egy egyszerű antenna, mikrofon, adott átvittel (HRTF), ábrázolható iránykarakteristikával. Ez utóbbi a HRTF függvényekből számítható polár diagram.

Ennek tükrében érthető, hogy elvben a hangszóró átviteli függvénye nem lényeges, hiszen az osztás során kiesik a számításokból. Annyiban azonban téves ez a megállapítás, hogy mélyfrekvencián, ahol már rossz az átvitel, ott a kiesés ellenére is rossz lesz a jel-zaj-viszony, így az alkalmazott hangsugárzó átviteli függvé-

nyét érdemes megvizsgálnunk. Ráadásul, a jó mélyfrekvenciás átvitelű hangszórónak általában hosszú az impulzusválasza, ami megnehezíti a mért eredményekben történő ablakolást, hiszen a hasznos rezgés időben át fog lapolódni a káros reflexiókkal.

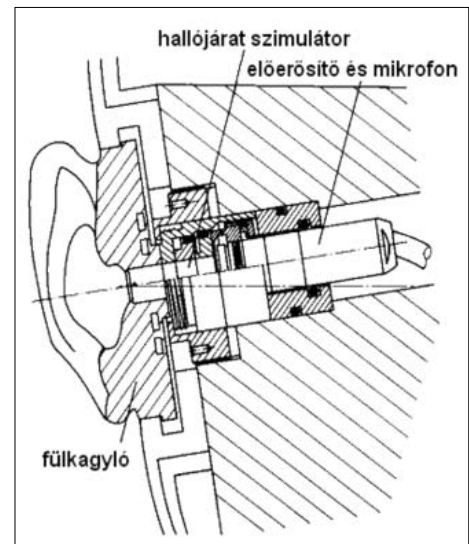
### 3. A binaurális technológia

A binaurális jelfeldolgozás első lépése a rögzítés, a felvétel. Amikor binaurális jeleket rögzítünk, az összes, a hangtérre jellemző paraméter bele van sűrítve a két fül jelébe. Elvileg, ezek helyes és tökéletes reprodukciója a teljes akusztikai információt hordozza [25]. A kutatók jó része irányul itt arra, hogy megtudjuk, az akusztikai információban mely részek miként hordozzák az irányinformációt. Az irányinformáció megléte, átvitele megfelel annak, hogy a hallgató nem vét nagyobb lokalizációs hibát a virtuális térben, mint egyébként tenné.

A szakirodalomban megtalálható, hogy nem csupán a dobhártyán, hanem a hallójárat középvonala mentén – beleértve a bejárati pontot is – ez az információ állandó, mérhető [26,27]. Továbbá igazolták, hogy a hallójárat bejáraatán végzett mérés és információgyűjtés független attól, hogy a hallójárat bejárata szabad-e vagy blokkolt (kitömött, azaz hang nem is terjed tovább a dobhártya felé) [19,28,29]. Más szóval, az irányinformáció előáll és teljes a fülkagyló „után”, közvetlenül a hallójárat bementén.

Ez jó, hiszen méréseket sokkal kényelmesebb itt végezni. Ezzel a műfejeket is egyszerűsíthetjük, nincs szükség a hallójárat (Zwislocki coupler) vagy a dobhártya impedanciájának modellezésre (4. ábra). Ez az elv arra épít, hogy a hallójárat szűk bemente pontforrásként működik, azaz a hallójáratban egydimenziós hangterjedés lép fel, abban már az irányinformáció nem változik.

Ha ezt elfogadjuk, az alábbi modellt állíthatjuk fel. Létezik a hallásnak egy irányfüggő és egy irányfüggetlen része. Ebben a modellben a hallójárat bemenetétől kifelé lévő teret egy Thévenin-helyettesítéssel írjuk le, melynek része a hangnyomás ( $P_{\text{blokkolt}}$ ) és egy generá-



4. ábra

Műfej keresztmetszeti képe a fülkagylóval, a hallójárat és a dobhártya szimulálásával

tor impedancia (5. ábra). Ez utóbbi megfelel a sugárzási impedanciának, mely a hallójáratból a külvilág felé látszik.  $P_{\text{blokkolt}}$  nem létezik normál hallásfolyamat során, de ha a bejárat blokkolt és a hallójárat üregében mérhető térfogatsebesség értéke zérus, akkor  $P_{\text{blokkolt}}$  éppen a fizikai akadály előtt mérhető hangnyomás.  $P_{\text{dobhártya}}$  a hangnyomás a dobhártyán,  $P_{\text{nyitott}}$  pedig a nyitott hallójárat bementén mérhető. A hallójárat egy kétkapu, melyet  $Z_{\text{dobhártya}}$  terhel. E kétkapu bemeneti impedanciáját a hallójárat bejárata felől látjuk ( $Z_{\text{hallójárat}}$ ). A HRTF definíciója tehát helyesebb, ha nem a dobhártyáig, hanem a hallójárat bármely pontjáig kiterjesztjük [25].

### 3.1. Felvétel

A binaurális szimuláció része tehát a felvétel, amikor a HRTF függvényeket mérjük meg, a jelfeldolgozás, amikor a megfelelő kiegyenlítést és szűréseket elvégezzük, végül a fejhallgatón keresztül történő lejátszás (6. ábra).

Binaurális felvételnél a rögzítés a hallgató hallójáratában történik. Ez lehet ténylegesen a dobhártya (a rá ragasztott mikrofon segítségével), a hallójárat valamely pontja, illetve a hallójárat bejárata. Kényelmi szempontból utóbbi a legelőnyösebb. Felmerül a kérdés, hogy maga a mikrofon mennyire zavarja meg a hangteret. A vizsgálatok azt igazolták, hogy a térbeli információtartalom (a hangforrások iránya, lokalizáció) szempontjából a méréseket lehetséges a blokkolt hallójárat bementén végezni. Másik elterjedt módszer a műfejek használata. A műfejek műanyag bábuk, felsőtesttel, fejvel, orral és gumi fülkagylóval [30-32]. Dobhártyájuk helyén mikrofonok találhatóak, és a hallójárat impedanciája is modellezett.

### 3.2. Jelfeldolgozás

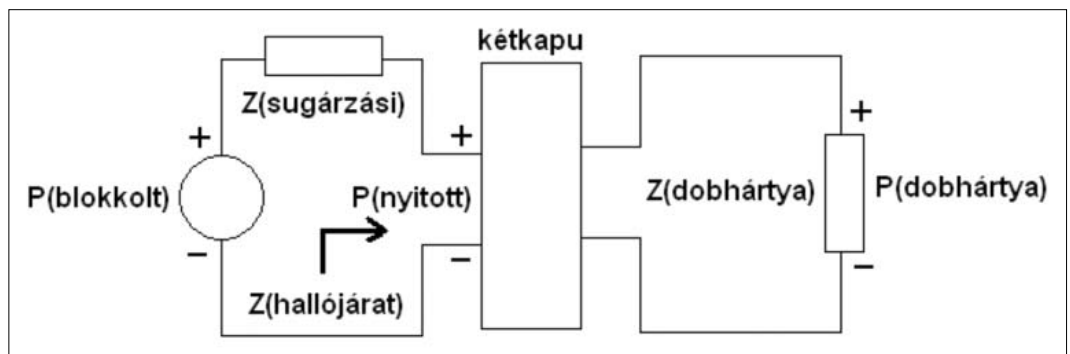
Lejátszás fejhallgatón keresztül történik, mert ez képes tökéletes bal-jobb csatorna szétválasztásra (áthallásmentesítés) és kellően jó hangszigetelésre, mely a külvilág zavarát csökkenti. Természetesen, elengedhetetlen a teljes átviteli út, kábelek, erősítők és különösen a fejhallgató komplex átviteli függvényének kiegyenlítése, linearizálása [27,33,34].

Ha méréshez és felvételhez műfejet vagy más embert használunk, mint a hallgató, a füljelek nem fognak megegyezni azzal, amit a saját fülével érzékelt volna. Ennek az oka a külső fül átviteli függvényeiben is keresendő [7,28].

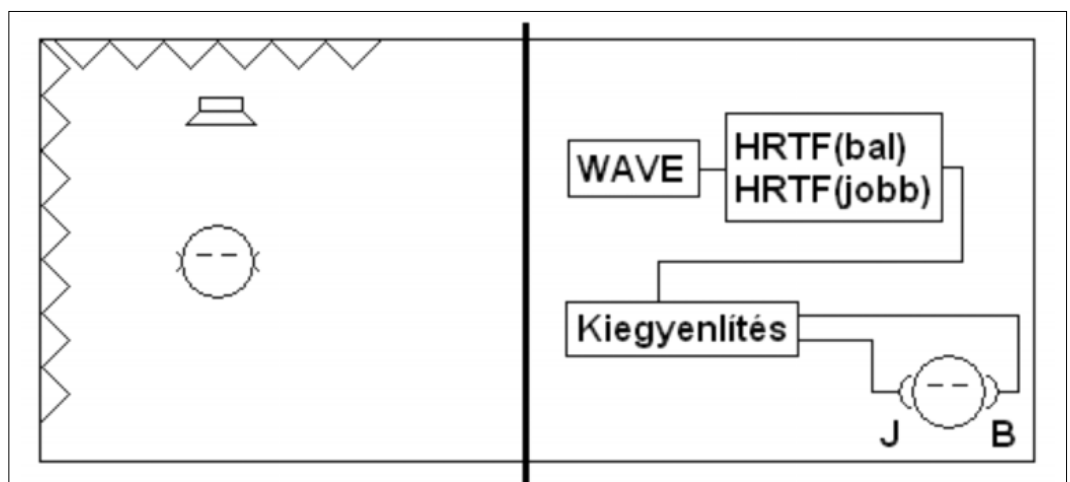
A binaurális szintézis tehát nem más, mint egy hangforrás (hangjel) megfelelő szűrése a HRTF függvényekkel, az átviteli út kiegyenlítése és a jelek fejhallgatón át történő kibocsátása. Ennek minőségét a különböző lokalizációs feladatok elvégzésével vizsgálhatjuk [35]. Ha tehát valamilyen módszerről azt állítjuk, hogy rosszabb egy másiknál, akkor azt értjük rajta, hogy a vizsgálatok eredménye rosszabb: a lokalizációs problémák megoldása gyengébb, a térbeli felbontóképesség romlik.

### 3.3. Fejhallgató kiegyenlítés

Tekintettel arra, hogy a HRTF mérésekhez és a hallójáratban végzett felvételekhez alkalmazott kisméretű mikrofonok átvitele kellően lapos, a kiegyenlítéshez tulajdonképpen elégséges a fejhallgató inverz átviteli függvényét előállítani. Ezt az átviteli függvényt ott kell mérni, ahol a felvétel is készül, tipikusan a blokkolt bejáraton (ugyanazon a kísérleti személyn).



5. ábra  
A külső fül modellje és Thévenin-képe



6. ábra  
Szabadtéri hallás a süketszobában és binaurális szimuláció fejhallgatóval

Idáig feltételeztük, hogy akin a mérést végezzük, az ugyanaz a személy, akin a fejhallgató átviteli függvényét is megmérjük, majd akin a kiegyenlítés után a lejátszást is megvalósítjuk. Ez azonban a valóságban körülményes és drága is lehet. Be kell vezetnünk az *individualitás* fogalmát, amelyet elveszítünk akkor, amikor más ember HRTF függvényeit használjuk lejátszáshoz [36]. De bármilyen módosítás és eltérés a fenti ideális képtől rontani fogja az eredményt. Az individuális eltérések oka elsősorban a fülkagylók, a test alakja és mérete különbözőségében rejlik. Minden embernek más a testmérete és már egész kis méretbeli eltérések a fülkagyló esetében vagy a fejhez közeli akusztikus környezetben kihatnak a HRTF függvényekre [37,38]. Az ilyen HRTF készletet ezért nem individuálisnak nevezzük.

A fenti elvhez tehát kiegészítésként jegyezzük meg, hogy egy ilyen folyamat csak egy ember számára lesz korrekt és az is csak elvben. Ettől függetlenül léteznek egyszerű, többé-kevésbé használható módszerek arra, hogy meglévő függvényeket individualizáljunk, például azzal, hogy a visszajátszáskor a hallgató fejméretét (hallójáratának távolságát) megadjuk, vagy hogy frekvenciában a spektrumot megfelelő módon módosítjuk [39-41].

HRTF mérésakor ügyelnünk kell arra, hogy nem csak az emberek között, hanem egy adott ember esetében is különböző függvényeket fogunk mérni ismételt mérések során: kénytelenek leszünk több mérés átlagát figyelembe venni. Belátható és mérésrel igazolható, hogy a blokkolt hallójárat bementén mért HRTF-kben a legkisebb az ilyen jellegű eltérés és a szórás [19]. Ugyanakkor az ilyen jellegű spektrális szórások, melyek adott irányból történő ismételt mérésekből adódnak, erősen irányfüggőek is. Szemből irányból lényegesen kisebb, mint hátulról vagy a fej átellenes oldaláról. Ennek oka a csökkent jelszint, a fej különböző árnyékoló hatása stb.

Élő emberekkel ilyen vizsgálatot végezni nehézkes, hiszen még rögzített fejű mérések esetén is mozognak, valamint a jel-zaj viszony sem magas az általánosságban használt impulzusválasz mérésekben. Ezzel szemben a műfejeket nagy jel-zaj viszonyú fehérzajú, sweep jelű méréseknek is kitéhetjük, nagy átlagolási idővel, hiszen ők türelmesen „végigülnek” az akár több órás vizsgálatokat is. Műfejes méréseink igazolták, hogy ismételt mérések során szemből irányból képesek vagyunk adott rendszerrel 0,5 dB eltéréseken belül újramérni a HRTF függvényeket, míg más irányokból, például a fej árnyékban elhelyezkedő fül esetén ez csak óriási (akár a 20 dB-t is meghaladó) eltérésekkel lehetséges [15, 37,38]. Ez rámutat arra a problémára, hogy az élő emberekkel végzett mérések eredményei eltérhetnek a műfejes mérésektől.

Tekintettel arra, hogy egy fejhallgató átviteli függvénye a lezáró impedanciával együtt értelmezett, annak mérését üzemi körülmények között kell végezni. Ez vagy emberi fejet vagy műfejet jelent, továbbá azt is, hogy ugyanannak a fejhallgatónak más és más lesz az átviteli függvénye, ha más ember teszi a fejére [42,43]. En-

nek individuális mérése és rendszerbe igazítása rendkívül körülményes. Megfigyeltük a mérések során, hogy az így mért átviteli függvények nagy szórást mutatnak (ugyanazon a fejen végezve is, ha azt többször leveszük-felhelyezzük) és még a legjobb hifi fejhallgatóknak sem elég lapos az átvitele tudományos vizsgálathoz. Egyszerű, alacsony rendű digitális szűrőt tervezni ennek kiegyenlítésére tehát nem egyszerű feladat, 7 kHz felett válnak erősen individuálissá a mérési eredmények.

A fejhallgató kiegyenlítését úgy képzelhetjük el, mint az átviteli függvényének inverzével való komplex szorzást a frekvenciatartományban. Így azok szorzatának eredője egységnyi lesz a kívánt sávban. Manapság a számítási kapacitás lehetővé teszi, hogy az ilyen műveleteket, beleértve a HRTF szűrést is, ne a frekvenciatartományban végezzük, hanem az időtartományban. Ehhez a konvolúciót és a dekonvolúciót hívjuk segítségül, a bemenő jel időfüggvényét, valamint a rendszerleíró függvények közül az impulzusválaszokat (HRIR) használjuk fel. Ezeket vagy közvetlen méréssel vagy számítással határozhatjuk meg.

Megjegyezzük, hogy teremakusztikai szimulációnál a manapság alkalmazott elv az, hogy rögzítik az adott terem impulzusválaszát (az úgynevezett Room Impulse Response Function függvényét) és ezt is beleveszik a számításokba úgy, hogy konvolválják a lejátszandó jellel. Így el tudjuk érni, hogy ugyanazt a jelet egy zengő templom, vagy egy nagy stadion tulajdonságaival ruházzuk fel.

A fejre való felhelyezés következtében beálló átviteli függvény változása kevésbé jelentős annál, mint a személyek közötti, így reális cél az, hogy adott fejhallgatót adott hallgatóra kiegyenlítsünk, de nem reális az, hogy egy fejhallgatót minden hallgatóra kiegyenlítsünk egy függvénnyel (feltehetőleg ezt meg is tennék a gyártók, ha így lenne). A túl nagy leszívások és csúcsok az átviteli függvényben veszélyesek, hiszen ezek kompenzálása hasonló magasságú kiegyenlítővel történik, és ha ezek helye változik a frekvencia-tengely mentén ismételt felhelyezéskor, akkor nagyobb hibát okozhatunk a végeredményben, mint előtte. Ezért túl gyenge minőségű fejhallgató kiegyenlítése elég reménytelen feladatnak tűnik.

### 3.4 Lejátszás

Mint már volt róla szó, a HRTF mérés és reprodukció, valamint a kiegyenlítés sikerét azon mérhetjük, miként teljesítenek az alanyok a virtuális térben történő lokalizációs feladatok során. Ezek az eredmények minősítik a felhasznált HRTF-eket. A kísérletek elején tehát referenciamérést kell végezni a szabadtéri hallással. Ilyenkor az alanyok a süketszobában valóságos hangforrás helyét vagy gyakrabban, korlátozott számú (néhány tucat) hangszóróból álló rendszer jeleit értékelik, lokalizálják.

Érezhető, hogy utóbbi esetben csak a hangszórók tényleges helye lehet valódi hangforrás, a hallgatók mégis érzékelhetnek hangszórók közötti forrásokat. Később, ugyanezek az emberek a fejhallgató szimulációban is

elvégezzük a feladatokat. Továbbá a látás is erősen befolyásolja a döntést, így általában eltakarják a hangszórókat az alanyok elől. A válaszokban előforduló hibákat az alábbi csoportokba szokás sorolni:

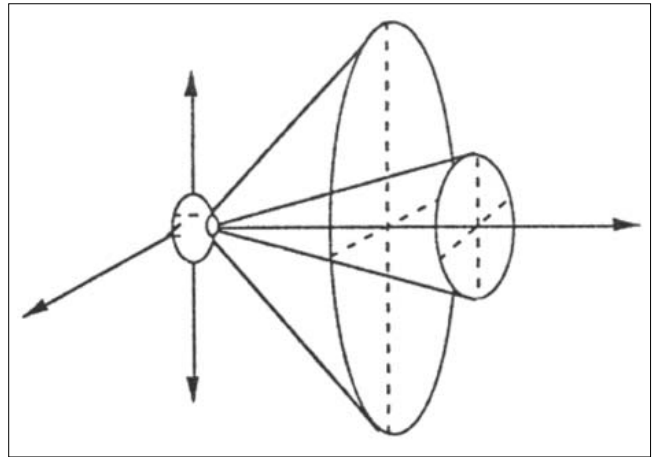
- Távolság hiba, ha jó az irány, de rossz a távolság érzékelése. Ezt csak ritkán mérik, ezért nem mindig paraméter a távolság a kísérletekben.
- Mediális síkbeli hiba, ha a szimulált és az érzékelt irány eltér, de mindkettő a mediális síkban van (ide tartozik az emelkedési szög rossz érzékelése, vagy az elől-hátul döntések összekeverése).
- „Kúpon belüli hiba” akkor fordul elő, ha a valós irány és az érzékelt eltér, de rajta vannak ugyanazon az úgynevezett interaurális kúpon [44]. Megállapítható ugyanis, hogy az interaurális időeltérések lehetnek azonosak különböző irányok esetén is. Az azonos időeltéréshez tartozó pontok egy kúpon helyezkednek el, adott távolság esetén pedig a kúppal való metszésponton, ami egy kör (7. ábra). A különböző források, melyek egy ilyen képzeletbeli kúpon vannak, könnyen összetéveszthetők.
- Kúpon kívüli hiba az összes többi hibalehetőség.

A kísérletek azt mutatták, hogy a felhasznált HRTF függvények alapján létezik egy minőségi sorrend [30-32]. Legjobb eredményeket az individuális, saját HRTF-vel érhetünk el. Ezt követi egy olyan emberi fej függvényei, aki alapjában jól tud lokalizálni (egy jó lokalizátor). Ezt követi a véletlenül választott emberi fej és az „átlagos” emberi fej, mely átlagos méretekkel rendelkezik.

Végül, a sor végén a különböző gyártók műfői találhatók. Látható, hogy a műfej sok előnnyel rendelkezik a mérés technikában, de virtuális szimulációhoz nem a legmegfelelőbb. Ennek oka, hogy egyszerre próbálja modellezni az összes emberi testet méretben, mely csak részben sikerülhet; azaz ami jó mindenkinek, az nem jó senkinek... Összehasonlításképpen, egy átlagos emberi fejen elért 26%-os mediális hibaérték 60%-ra nőtt műfej esetén.

### 3.5. Fejhallgató hibák

A fejhallgató lejátszásnak önmagában is van több hibaforrása. Az a tény, hogy elveszítjük a légtérjedés hatását (hiszen az átalakító és a membrán valójában néhány cm-re van a fültől), az áthallást a két fül között (hacsak direkt nem szimuláljuk) és a fejmozgás hatását, máris rontja a lokalizációt. Különösen utóbbi lényeges, hiszen a normál életben a lokalizációhoz nagyon fontos elem a fejünk forgatása. Ennek során állítjuk ugyanis be fejünket a legérzékenyebb irányba, hasonlóan ahhoz, ahogy egy antennát is ráfordítunk az adóra. Fejhallgató esetén ezt a lehetőséget elveszítjük, mert a fej forgatásával a teljes szimulált hangkép is együtt mozog. Ennek hatása az lesz, hogy a hallgatókban gyakran úgynevezett *fejközép-lokalizáció* alakul ki: úgy érzik, a hangforrás a fejük belsejében, középen helyezkedik el, nem pedig azon kívül [29,45-47]. Az ilyen hiba nagyon gyakori és jelentősen ronthatja a lokalizációt vir-



7. ábra

*Az interaurális időeltérések kúpja. A kúpon, illetve a körön elhelyezkedő pontok azonos hallásérzet kialakulásához vezethetnek [44].*

tuális térben. Modern rendszerek képesek ezt a hatást számítással módosítani, és visszacsatolás révén érzékelni a fej helyzetét (a fejhallgatóra szerelt lézeres adóval), majd valós időben a megfelelő HRTF függvények cserélgetésével a hangképet stabilan tartani [41,48]. Ez valóban csökkenti a fejközép-lokalizációt, ugyanakkor költséges és nehézkes feladat megvalósítani. Az ilyen fejmozgás érzékelő rendszerek a komoly virtuális valóság szimulátorok szükséges kellékei.

Általánosságban elmondható, hogy a lokalizáció a virtuális térben rosszabb, mint a valóságban. Ennek oka a fejhallgatók hibái, a HRTF függvények tökéletlensége, és egyéb paraméterek melyek az akusztikai irányinformációt hordozzák és a virtuális szimuláció során sérülnek. A kutatások jó része irányul arra, hogy az ilyen szimulátorok minőségét, lokalizációs képességeit feljavítsuk.

## 4. Összefoglalás

A cikk röviden bemutatta a virtuális hangtér szimuláció eszközeit, lépéseit. Bevezette a halláskutatás néhány alapfogalmát, a használatos átviteli függvényt és mérési módszereit, a lokalizációs vizsgálatok jelentőségét. A szimuláció során hangforrásokat hozunk létre, látunk el irányinformációval egyszerű digitális szűrési eljárásokkal, végül prezentáljuk a hangteret fejhallgatón keresztül. A fejhallgató hibái erősen befolyásolhatják a szimuláció sikerét, a lokalizáció eredményességét és az egész virtuális szimuláció összbemomását. A különböző paraméterek vizsgálata, az eltérő peremfeltételek megvalósítása és a szimulációk pszichoakusztikus lehallgatási teszteken történő kiértékelése az emberi térhallás-kutatásnak ma is érvényes és használatos módszere.

A bemutatott binaurális technológia áttekintést ad a hangtechnika legmodernebb virtuális szimulációs lehetőségeiről, mely mitsem veszített aktualitásából. Különösen érdekes ez a tudományos kutatás számára, ahol az emberi érzékelés határait vizsgáljuk. Nem elhanya-

golható szempont az orvosi alkalmazás, halláskárosultak és vakok tájékozódását elősegítő rendszerek fejlesztése.

Végül, a legmodernebb virtuális valóság szimulátorok képességei mára meghaladják a korábban elképzelhetlent: egyszerre alkalmazza a hallás, a látás, sőt a tapintás és hőérzékelés lehetőségeit is, különböző kesztyűk és sisakok, bonyolult visszacsatolt eszközök segítségével melyek egyelőre a repülőgép- és űrkutatás eszközei.

## Irodalom

- [1] J. Blauert:  
Spatial Hearing.  
The MIT Press, MA, 1983.
- [2] W. M. Hartmann:  
How we localize sound.  
Physics Today, pp.24–29., 1999.
- [3] E. A. G. Shaw:  
Transformation of sound pressure level from the free-field to the eardrum in the horizontal plane.  
J. Acoust. Soc. Am. 56(6), pp.1848–1861., 1974.
- [4] S. Mehrgart, V. Mellert:  
Transformation characteristics of the external human ear.  
J. Acoust. Soc. Am. 61(6), pp.1567–1576., 1977.
- [5] D. Hammershøi, H. Møller:  
Free-field sound transmission to the external ear; a model and some measurement.  
DAGA'91, Bochum, pp.473–476., 1991.
- [6] C. B. Jensen, M. F. Sorensen, D. Hammershøi, H. Møller:  
Head-Related Transfer Functions: Measurements on 40 human subjects.  
Proc. of 6th International FASE Conference, Zürich, pp.225–228, 1992.
- [7] H. Møller, M. F. Sorensen, D. Hammershøi, C. B. Jensen:  
Head-Related Transfer Functions of human subjects.  
J. Audio Eng. Soc. 43(5), pp.300–321., 1995.
- [8] J. Blauert:  
Untersuchungen zum Richtungshören in der Medianebene bei fixiertem Kopf.  
Dissertation, Techn. Hochschule Aachen, 1969.
- [9] C. I. Cheng, G. H. Wakefield:  
Introduction to Head-Related Transfer Functions (HRTFs): Representations of HRTFs in Time, Frequency and Space.  
J. Audio Eng. Soc. 49, pp.231–249., 2001.
- [10] V. Mellert, K. F. Siebrasse, S. Mehrgardt:  
Determination of the transfer function of the external ear by an impulse response measurement.  
J. Acoust. Soc. Am. 56, pp.1913–1915., 1974.
- [11] P. Berényi, Gy. Wersényi:  
A külső fül fejre vonatkoztatott átviteli függvényeinek vizsgálata. Akusztikai Szemle (Acoustical Review), Budapest, Vol. IV., Nr.1-4., pp.35–41., 1999.
- [12] H. Fisher, S. J. Freedman:  
The role of the pinna in auditory localization.  
J. Audiol. Research 8, pp.15–26., 1968.
- [13] A. Illényi, Gy. Wersényi:  
Discrepancy in binaural tests and in measurements of sound field parameters.  
Proc. of the International Békésy Centenary Conference on hearing and related sciences, Budapest, pp.160–165., 1999.
- [14] Gy. Wersényi:  
On the amplification-damping-effect of the pinnae and of the head.  
Akusztikai Szemle (Acoustical Review), Budapest, Vol. VI., Nr.2., pp.23–28., 2005.
- [15] Gy. Wersényi:  
HRTFs in Human Localization: Measurement, Spectral Evaluation and Practical Use in Virtual Audio Environment.  
Ph.D. doctoral thesis, BTU Cottbus, 2002.
- [16] J. Blauert:  
Sound Localization in the median plane.  
Acoustica 22, pp.205–213., 1969/1970.
- [17] J. C. Makous, J. C. Middlebrooks:  
2-dimensional sound localization by human listeners.  
J. Acoust. Soc. Am. 87(5), pp.2188–2200., 1990.
- [18] J. C. Middlebrooks, D. M. Green:  
Sound localization by human listeners.  
Ann. Rev. Psychol. 42, pp.135–159., 1991.
- [19] D. Hammershøi, H. Møller:  
Binaural Technique – Basic Methods for Recording, Synthesis, and Reproduction.  
In J. Blauert (Editor) Communication Acoustics, Springer Verlag, pp.223–254., 2005.
- [20] R. H. Domnitz, H. S. Colburn:  
Lateral position and interaural discrimination.  
J. Acoust. Soc. Am. 61, pp.1586–1598., 1977.
- [21] W. M. Hartmann, B. Rakerd:  
On the minimum audible angle – A decision theory approach.  
J. Acoust. Soc. Am. 85, pp.2031–2041., 1989.
- [22] D. R. Perrott, A. D. Musicant:  
Minimum auditory movement angle: binaural localization of moving sources.  
J. Acoust. Soc. Am. 62, pp.1463–1466., 1977.
- [23] Gy. Wersényi:  
Localization in a HRTF-based Minimum Audible Angle Listening Test on a 2D Sound Screen for GUIB Applications.  
Audio Engineering Society (AES) Convention Preprint Paper, Nr. 5902., Presented at the 115th Convention, NY, 2003.
- [24] A. Illényi, Gy. Wersényi:  
Environmental Influence on the fine Structure of Dummy-head HRTFs.  
Proc. of the Forum Acusticum 2005, Budapest, pp.2529–2534.
- [25] H. Møller:  
Fundamentals of binaural technology.  
Applied Acoustics 36, pp.171–218., 1992.