

A térbeli hallás

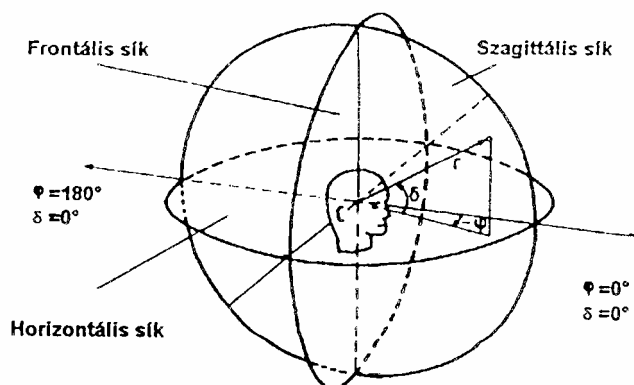
1. Alapfogalmak

Az ember, mint látó lény, „legfontosabb” érzékszerve, a szem alapján szerez információt a környezetéről. A hallás szerepe másodlagos, ezért kevésbé fejlett, sőt a hallást a látvány befolyásolni is képes.

A *hang* valamilyen rugalmas közeg mechanikai rezgése és hullámozása az emberi hallás frekvenciáján (20 Hz-20 kHz). Azon forrást, amely a hangot kelti (rezeg, és a közeget rezgésbe hozza) *hangforrásnak* nevezzük. Jellemző rá a *helye*, amit az iránnyal, a távolsággal, és a szöggel adunk meg.

A háromdimenziós vonatkoztatási rendszer az ún. fejhez rögzített (head-related) koordináta-rendszer. Síkjai: a fej szimmetriasíkja (mediális vagy szagittális sík), a hallójárat középvonala és a szemgödör alsó csontján átfektetett (horizontális), valamint az ezekre merőleges és a hallójáratok elülső peremére fekvő (frontális) sík. Ezek metszéspontja az origó, valahol a fej belsejében található (1.1.ábra). A vízszintes síkban az oldalirányú kitéréseket, a mediális síkban az előre-hátra iránymeghatározást vizsgálhatjuk (ebben a koordináta-rendszerben).

Jelöljük φ -vel az oldalszöget, azaz a „pontosan szemben” iránytól ($\varphi=0^\circ$) való eltérést a vízszintes síkban. A „pontosan hátul” irány felel meg $\varphi=180^\circ$ -nak. Delta szög az emelkedési (elevációs) szög. A mediális síkban $\delta=0^\circ$ a fülek síkja, 90° a fej feletti, 180° a fej mögötti. A távolságot r rel jelöljük.



1.1.ábra. A fejhez rögzített koordináta-rendszer.

Hallásérzetnek nevezzük azt a jelenséget, amely a hallórendszerben valamilyen hangforrás hatására létrejön. Az *érzet kialakulásának helye* szintén leírható a távolsággal, szöggel, és az iránnyal.

Fontos előrebecsíteni, hogy *a hangforrás helye egyáltalán nem biztos, hogy megegyezik a hallásérzet helyével*. Lényeges e két dolgot megkülönböztetni, és a vizsgálatok is erre irányulnak: milyen kapcsolat van az érzet kialakulásának helye (ahonnan a forrást hallani véljük), valamint a hangforrás helye és sugárzási módja között? A kérdés, miként képes a hallás az akusztikai információtartalmat a fizikai hanghullámból kinyerni [6]? A cél általában az, hogy a lejátszáskor (a felvétel visszaadásakor) hangszórókkal minél jobban közelíteni tudjuk a felvétel eredeti térbeli hatását, és a valósághoz hűen reprodukálhassuk azt.

Ezek alapján általánosságban az észlelt *hang* az, amit akusztikailag érzékelünk, és ami meghatározza az érzékelést időben és térben. Természetesen nem minden rezgésből lesz észlelés.

A *helymeghatározhatóság*, azaz a *lokalizálhatóság* a hangforrás ill. a helyére vonatkozó kialakult érzetre jellemző. Megmondja, hogy az adott körülmények között mekkora a már érzékelt minimális helyváltoztatás, és az hogyan változik térben és időben. Egy forrás esetén is ez általában időben változó, tehát idővariáns.

Az *irányhallás*, mint képesség, az emberi fejlődés során alakul ki, és lesz egyre jobb tapasztalati úton. Az irányhallás olyan ösztönös folyamat, mely során a különböző forrásokat egymástól el tudjuk különíteni, és nem lép fel ún. diffúz hallástér. Ez utóbbi esetben a hallás az irány pontos meghatározására már nem, csak egy egységes hallásérzet létrehozására képes az agyban (minden irányból azonos hangterjedést észlelünk). Erre még a későbbiekben visszatérünk.

Szólni kell a kísérleti metodikáról is. A méréseket embereken végezzük, tehát rájuk vagyunk utalva, és kénytelenek vagyunk elfogadni megfigyeléseiket. Szubjektív, és egyénenként eltérő jellemzőket kell nekik számszerűsíteni, és leírni. A kísérleti személyek egyszerre töltik be a mérőeszköz és a mérés tárgya szerepét is. Ezen „visszacsatolás a hallásélményről” nagyon fontos a kísérletet végzőnek, ezért gyakran a megfigyelő és a kísérleti alany ugyanaz a személy. Bizonyos esetben a mérést befolyásolja, hogy a kísérleti személy mennyire gyakorlott, azaz kellő tanulási idő alatt jobb eredményeket tud produkálni, miután megszokta, kiismerte a jelet. A vizsgálatokat bekötött szemű emberekkel végzik, hogy a látvány ne befolyásolja őket.

A mérő (kondenzátor) mikrofonok elhelyezésekor ügyelni kell, hogy a teret ne zavarják, ne okozzanak az egészségre károsodást (pl. dobhártyára ragasztott mikrofonok esetén), és hogy a teljes hangfrekvenciás sávban képesek legyenek mérni.

A mérések másik módja, ha műfejet (dummy-head), vagy jobb esetben torzót (head and torso simulator) használunk. Ezek a gyárilag készített műanyag bábuk az emberi felsőtestet és fejet modellezik, különös tekintettel a fülkagylóra és a hallójáratra. A hangot a dobhártya helyén elhelyezett mikrofonok érzékelik. Tekintettel arra, hogy az igazi embereken végzett kísérlet nehézkes, kényelmetlen, és a mozgásból adódóan pontatlan, a műfejes mérések hosszú és reprodukálható méréseket tesznek lehetővé. Ne feledjük azonban, hogy anyagában, hőmérsékletében...stb. *eltér* az igazi emberi fejtől, és alapjában visz torzítást a rendszerbe. A kísérletek azt bizonyítják, hogy a minőségük messze nem tökéletes, és a véletlen módon kiválasztott igazi emberi fej is „jobb” térbeli minőségű felvételt szolgáltat [5].

A hallásfolyamat általános modellje szerint a hangforrás egy S_0 vektorral írható le, ami az $s_1, s_2, \dots$ különböző hangforrásjellemzőket tartalmazza. Ez a bemenet (a hallórendszerbe), ahol a kialakuló a hallásérzetet egy H_0 vektorral írunk le. Elemei a $h_1, h_2, \dots$ hallásérzet jellemzők, amelyek az agyban jönnek létre, és természetesen nem mérhetők. Csak az ezek alapján (az élmény leírásával) előálló B_0 ($b_1, b_2, \dots$) vektor. H_0 és B_0 tehát függvénye S_0 -nak.

Érzeti vizsgálatoknál különböző skálázási módszereket ismerünk, és használunk attól függően, mi a cél.

A *nominális skála* csak megkülönbözteti a csoportokat, de mennyiségi információt nem hordoz. Ez csak megkülönböztetés, és nem számít melyik az egyes és melyik a kettes csoport. Például a hallott hangokat két csoportba sorolhatjuk aszerint, hogy impulzusszerűek vagy hosszan kitartottak. Az *ordinális skála* figyelembe veszi a csoportszámok közötti sorrendet, ezért nem mindegy melyik csoportot mivel jelölünk meg.

Füljelnek hívjuk a valamelyik fül dobhártyáján mérhető hangnyomás időfüggvényét, melynek jellemzőit (időben, spektrálisan) vizsgálni fogjuk, hogy azok milyen kapcsolatban állnak a térbeli hallással.

A *lokalizáció* az a helymeghatározási folyamat, melynek során a hallás kiértékeli a füljeleket, és információt szerez a hangforrás helyéről. A *lokalizációs bizonytalanság* az a küszöb, mely alatt a hallórendszer a térbeli jellemzőket nem képes megkülönböztetni. Ezen határ alatt a hangforrás (pontosabban a kialakult érzet) helyének megváltozását nem vagyunk képesek érzékelni, azaz nem észleljük, hogy helyváltoztatás történt volna.

Ezek után természetesen nem mindegy, hogy a kísérleti személytől azt kérjük, hogy határozza meg a hallásérzet helyét, avagy (ez, és a rutinja alapján) becsülje meg, hogy hol a forrás! A kísérletek nagy része irányult arra, hogy megismerjék mi az, amittől ezek egybe esnek, és mi lehet az oka, ha nem.

Általában kétféle gerjesztő jelet (hangjel) használunk: a *Dirac-impulzus*, időben $25 \mu s$ -nál rövidebb, ennek következtében spektrálisan kb. egyenletes energiájú a $16 \text{ Hz} - 16 \text{ kHz}$ frekvenciatartományban. Akkor használjuk, ha időben (időtengelyen) szeretnénk rövid idejű gerjesztést adni, és az erre adott *impulzusválaszt* keressük (pl. visszhang vizsgálatok esetén).

A másik a *szinusz jel*, amely időben sokáig tart, de frekvenciában diszkrét (ideális esetben egy spektrumvonal). Erre akkor van szükség, ha a frekvenciatengelyen az energiát „egy pontra” szeretnénk koncentrálni, de ehhez „időben végtelen jelre” van szükség.

A *Gauss-jel* úgy időben, mind frekvenciában „gaussos” lefutású, tehát időben és frekvenciában is véges kiterjedésű.

A méréstől függően használunk még többfrekvenciás (sweep) szinuszos jelet, melynek során a legkisebbtől a legnagyobb frekvenciáig végigmérjük a tartományt adott frekvenciaértékeken. A *zaj*, mint gerjesztés, lehet *multiszinuszos* jel, mely minden frekvencián tartalmaz komponenset, és lehet a mérési célokra készült *zajgenerátor* jele (fehérzaj). Speciális mérési eljárás, mikor a rendszer *sajátzaját* használjuk gerjesztő jelnek (periodikus pszeudo-random zaj).

A méréseknél különböző közelítéseket is alkalmazunk. Kihasználjuk, hogy a gömbhullámú teret előállító hangszóró kellően nagy távolságban közel síkhullámú teret létesít (1 m. felett már távotérnek tekintjük).

2. Térbeli hallás egy hangforrás esetén

Ez az alapeset, melyből kiindulva megismerkedünk a térbeli hallás alapvető jellemzőivel. A továbbiakban mindig *szabad hangterjedést* feltételezünk, azaz a mérés reflexiómentes süketszobában történik. Ezt az elemi esetet lehet általánosítani több forrás esetére is, további szabályok figyelembevételével.

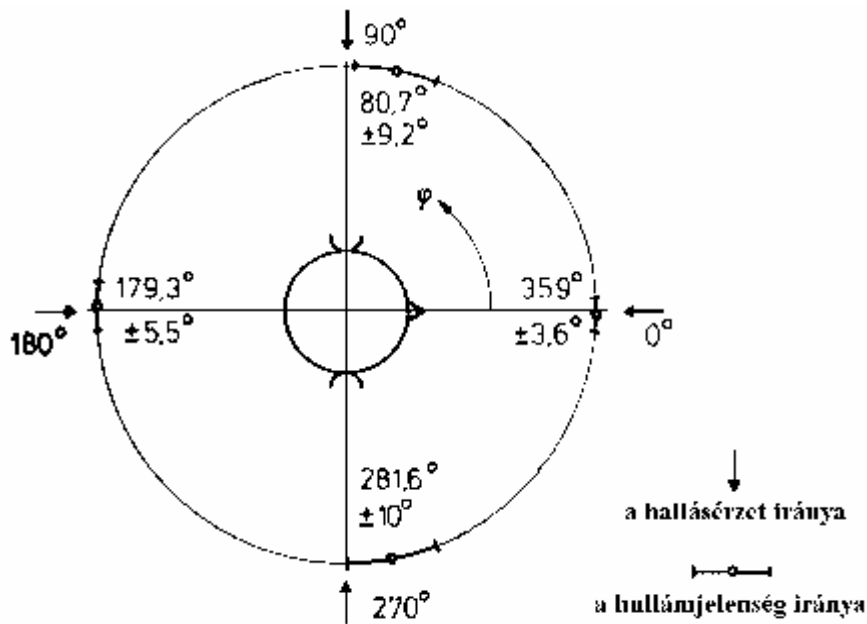
2.1. A lokalizáció és a lokalizációs bizonytalanság

A *lokalizáció* során a hallás a hallásérzet helye és a hullámjelenség meghatározott ismertetőjelei között létesít kapcsolatot. Ezen jellemző(k) kis megváltozása helyváltoztatás-érzetet kelthet. A lokalizációs bizonytalanság az a minimális helyváltoztatás, amit a hallórendszer már érzékelni tud, azáltal, hogy a füljelben történt változást már ki tudja értékelni.

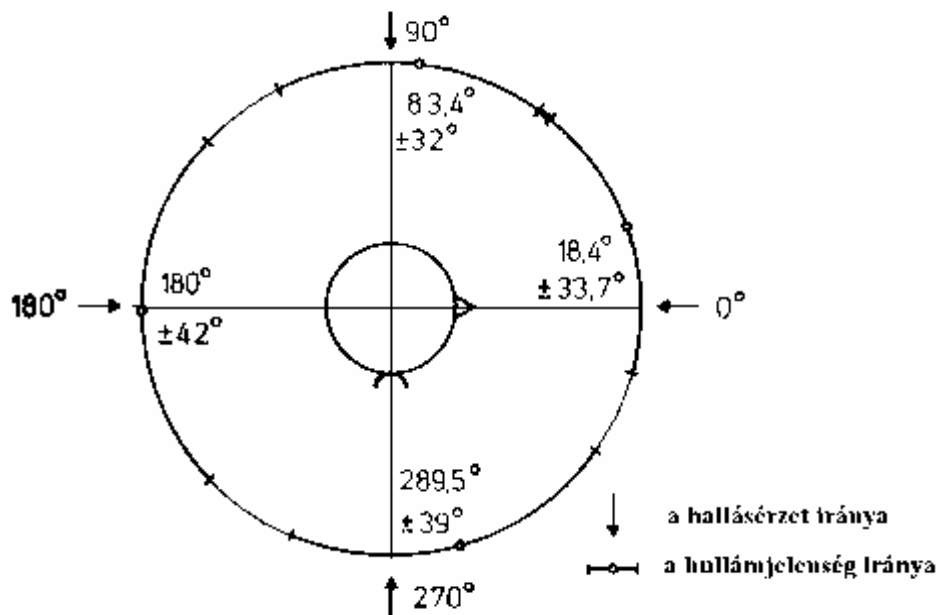
A hallásérzet kialakulásának helye döntő jelentőségű. Ez elsősorban a hangforrástól (helyétől, erősségétől, és múltbeli előéletétől is) függ. Figyelemre méltó tény, hogy egy forrás esetén is alakulhat ki több hallásérzet.

A minimális lokalizációs bizonytalanság, azaz a hallás térbeli felbontóképessége a kísérletek szerint 1° körüli (az abszolút minimum), és ez kb. két nagyságrenddel rosszabb, mint a látórendszer érzékenysége, ami $1'$ -nél kisebb változásokat is érzékelni képes.

A horizontális síkban a „szemben” irányban a helymeghatározás $\pm 3^\circ$ körüli minimális bizonytalanságot mutat, „oldalt” $\pm 10^\circ$, „hátról” $\pm 5^\circ$ (1.2.-1.3. ábra). Csökken a bizonytalanság (tehát javul a felbontóképesség) időben hosszan tartó jeleknél (szinuszos), mert ekkor több ideje van a fülnek a feldolgozásra és az információ kinyerésére, ellentétben az impulzusgerjesztés esetével. A bizonytalanság a frekvenciától is függ.



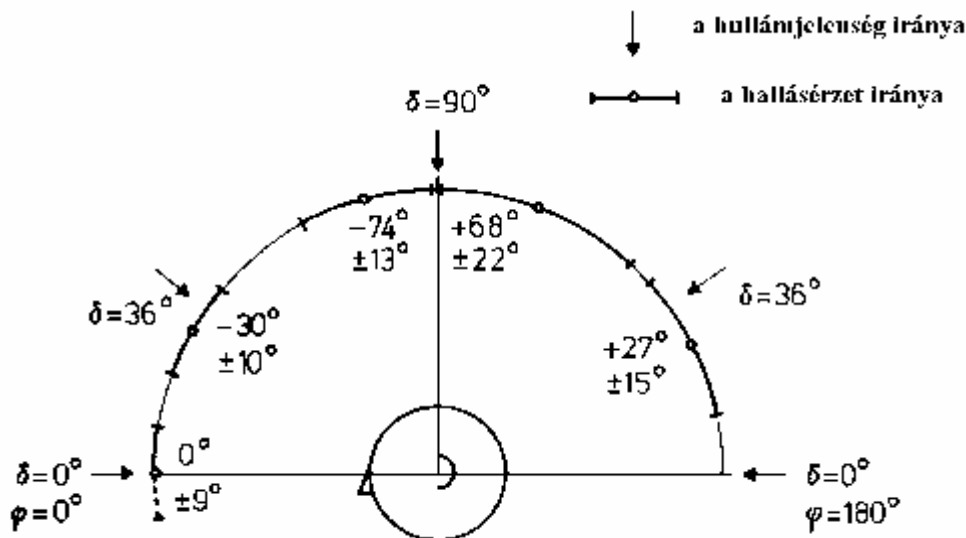
1.2.ábra. A lokalizációs bizonytalanság ($\Delta\varphi_{\min}$), és a lokalizáció a horizontális síkban. 900 alany, 100 ms.-os fehérzaj impulzus, 70 phon, a fej fixált. A lokalizáció esetén a hangszórót a megfigyelő mozgatta úgy, hogy azt a nyíl által jelölt irányból hallja. A hangszóró ekkor a „hullámjelenség iránya” tartományban volt [1].



1.3.ábra. Ugyanaz a feladat 32 alannyal. A különbség, hogy a bal fül teljesen süket [1].

Függőleges síkban elhelyezkedő forrás esetén elméletileg *mindkét fül ugyanazt a gerjesztő jelet kapja az egész síkban* (feltéve, ha a fej szimmetrikus). Beszédjelre vonatkoztatott lokalizációs bizonytalanság ismert beszélő esetén szemben $\pm 9^\circ$ (1.4.ábra), de ismeretlennél $\pm 17^\circ$ -ra nőhet. Ismeretlen jeleknél felléphet az a hatás, hogy az impulzus jelet az ember a fej mögötti hátsó szektorokban érzékeli, holott a forrás szemben van. Ezt a jelenséget, amikor a megfigyelő a forrást a mediális síkban észleli, de az elől-hátul iránymeghatározásban téved (összekeveri) *front-back* hibának

nevezzük. A lokalizációs vizsgálatok alapvető módja ennek hibaszázalékos összehasonlítása. Fontos, hogy a hallásérzet iránya nem csak a hullámforrás irányától, hanem a frekvenciától is függ.



1.4.ábra. A lokalizációs bizonytalanság ($\Delta\delta_{\min}$), és a lokalizáció a mediális síkban, ismert beszélő esetén. 7 alany, 65 phon, a fej fixált. A vizsgálójel más, mint az 1.2.ábra esetén [1].

A térhallást három jellemző alapján vizsgáljuk: irányhallás a horizontális (vízszintes) ill. a mediális síkban, valamint a távolsághallás alapján. Bizonyos nehézségek a vízszintes síkban történő méréseknél felléphetnek:

1. Több (keskenysávú) jel összege több helyről érkezőnek tűnhet. Ez az oka, hogy az egy helyben ülő madár éneke úgy tűnhet, mintha az közben változtatná a helyét.

2. Relatíve keskenysávú jelek esetén előállhat az a jelenség, hogy az érzet nem a hang beesési iránya felől, hanem a *fül tengelyére tükröszimmetrikusan* (pl. a beesés 30°, érzet kialakulás 150°-os irányból) lép fel.

Ezek a jelenségek nem lépnek fel, ha a fej mozoghat, ezért ez nagyon lényeges paraméter. Először *rögzített fejű* méréseket végeztek.

Távolsághallásnak nevezzük a hallásnak azt a folyamatát, mikor az agy a füljel bizonyos jellemzőiből a hangforrás távolságára következtet. A távolság meghatározásának pontossága jelfüggő, ezért lényeges, hogy a megfigyelő ismerje-e a jelet. *Beszédnél* a távolság meghatározhatóságának határa 3-7 méter, attól függően, hogy a jel suttogó vagy normál beszéd. Természetesen a távolság és a helymeghatározhatóság erősen függ magától a távolságtól és a forrás hangosságától is: 3 m.-nél nagyobb távolság, és ismeretlen zaj esetén a lokalizálhatóság már nem is a forrástávolságtól, hanem elsősorban a hangerőtől függ.

Fontos a jelforrás *helyváltoztatásának gyorsasága* is. A hallás bizonyos „tehetetlenséggel” rendelkezik, azaz bizonyos időre van szüksége, hogy a forrás helyváltoztatását követni tudja. Egy kísérlet során körben elhelyezett hangszórókból adták a jelet, különböző sebességgel járatván azt körbe-körbe. Megfigyelték, hogy ha a forgás sebessége elég lassú, akkor a hallás az elfordulást érzékeli, és a megfelelő hangszóróhoz az érzetet helyesen hozzá tudja rendelni. Ha gyorsul a mozgás, akkor

olyan érzés alakul ki a hallgatóban, mintha a forrás jobbra-balra pattogna. Túl gyors változás esetén pedig diffúz hangtér alakul ki a fejben, és úgy tűnik, minden hangszóró egyszerre szól.

2.2. A hangtér a fülek közelében

Műfejes méréseknél a műfej hallójáratában, a dobhártya helyén elhelyezett mikrofonnal felvett jelet vizsgálják. Ez csak torzulásokkal lehetséges, hiszen a legjobb utánzat is eltér az emberi hallószervektől [4]. Mivel a legfontosabb jel a térbeli hallás szempontjából a hallójáratban a dobhártyát érő füljel, érthető, hogy ennek mérése az emberi dobhártyára ragasztott mikrofonnal kellemetlen, és nehéz. (A fej fixálása is, ami itt nem gond.) Sajnos, már a legkisebb zavar a füljelben észrevehető zavart okoz a térhallásban, ezért a legfontosabb feladat *a füljel tulajdonságainak, jellemzőinek meghatározása*, és hogy ezek hogyan függnek a hullámforrás helyétől, és miképpen hatnak a térbeli érzetre.

A tapasztalat azt mutatja, hogy a legjobb műfejek is magas frekvenciákon eltérő szűrőhatást produkálnak, mint az emberi fej. Ez lehet az oka annak, hogy a lokalizációs feladatok (front/back döntés) megoldása rosszabb a műfejes felvételeknél, mint az igazi fejen készült esetén [4]. Az eredmények szerint, a saját hallás 15%-os, a véletlenszerűen kiválasztott emberen készült felvétel 36%-os, tipikus igazi emberi fejen 22%, a műfejes felvétel esetén 40-50%-os a tévesztés hibaszázaléka [5]. Ebből az a következtetés vonható le, hogy könnyebb találni véletlen emberi fejet, melyen jobb felvételt lehet készíteni, mint bármelyik műfejen, ami azok gyenge minőségére utal [5].

2.2.1. A dobhártya

A dobhártya nyomásérzékelőként működik: erő hatására lengésbe jön. Akusztikai impedanciája kb. megegyezik a vízfelszínével (a reflexiótényező kb. 1). A terjedés a hallójáratban csak a lezárástól függ, de a dobhártya impedanciája nehezen mérhető. Élő emberen lézerrel, optikai tükrrel, esetleg kapacitív szondával mérnek. Halottakon a mérés könnyebb, de az eredmények eltérnek az élő emberi dobhártyán mértéktől.

Direkt mérési módszer a hangnyomás és a hangsebesség mérése a dobhártyán (kitérés és annak deriváltja) melyből számolással kapjuk az impedanciát.

A frekvencia függvényében az impedancia változik. A valós rész 1, 3, 5 kHz-en mutat kiemelést, míg a képzetes csökkenő és kevésbé dinamikus lefutású. Az értéke

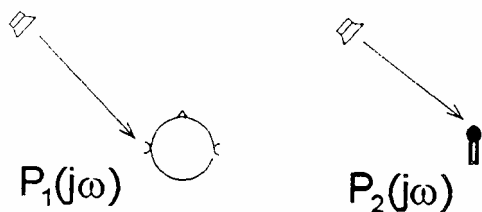
$0 - 0.4 \cdot 10^8 \frac{Ns}{m^5}$ között mozog.

2.2.2. A fülkagyló

A fülkagyló, mint *lineáris szűrő*, *lineáris torzítással* vesz részt a hallásban. Frekvenciaátvittele irány- és távolságfüggő. A beérkező hanghullámokat a hallójárat felé reflektálja, így hatásával *hanggyűjtő* szerepet tölt be, de ugyanakkor *árnyékol* is a forrás irányától függően. Mivel a reflexiós felülete kisebb a hullámhossznál szóródás is fellép (a szóródás és a diszperzió időinvariáns lineáris torzítás). Az átvitelt 5 rezonáns pont (saját frekvenciákon) befolyásolja: ezek 3,5,9,11,13 kHz-en vannak, ahol kiemeléseket okoznak a beérkező jelben.

A fülkagyló a hallójáratral együtt *akusztikus rezonátort* alkot. Az egyes sajátrezgések gerjeszthetősége irány- és távolságfüggő, valamint befolyásolja a fej hangteret zavaró hatása is. A síkhullám elhajlását egy együttthatóval jellemezhetjük.

A hangnyomás átviteli függvénye (a hangforrástól a dobhártyáig) függ a dobhártya impedanciától, a hallójáratától, a fülkagyló és a fej együttes hatásától. Azt az átviteli függvényt, ami leírja az átvitelt különböző beesési irányokból a szabadtérből a hallójárat tetszőleges pontjáig (a dobhártyáig) a *külső fül komplex átviteli függvényének* nevezzük (1.5.ábra). Ezen HRTF (Head Related Transfer Function) függvényeket a fejhez rögzített koordináta-rendszerben mérjük [7],[16].



1.5.ábra. A HRTF értelmezése. P_1 a hangnyomás a dobhártyánál, P_2 a forrás ugyanazon helyzete és ugyanolyan hangjel mellett a fej középpontjában (fej nélkül) mérhető hangnyomás. $HRTF = \frac{P_1(j\omega)}{P_2(j\omega)}$

2.2.3. Az átviteli függvények

A külső fül funkciója az átvitel szempontjából érdekes. Kérdés, milyen lineáris torzítás lép fel, és azt milyen átviteli függvény írja le. Háromféle átviteli függvény létezik:

1.*Szabadtéri*: a hallójárat egy pontján mért hangnyomás (tetszőleges beesési irány és távolság esetén) és azon hangnyomás között, amit ugyanezen forrás (távolság, irány...stb.) esetén a fej középpontjában mérhetnénk. Ebben az esetben a dobhártyán kell mérni. Ez azonos a hallójárat bementén lévő méréssel, csak ekkor figyelembe kell venni, hogy az átviteli függvény egyenlő a mért átviteli függvény és a hallójárat átviteli függvényének együttesével.

2.*Monaurális*: a hallójáratban lévő hangnyomás tetszőleges irányú és távolságú forrás esetén, viszonyítva a hangnyomáshoz egy meghatározott helyű referencia forrás esetén. Ez általában $\varphi=\delta=0^\circ$. Ekkor a hallójárat mérési pont is megfelelő, mert a

referencia is ott van. Ezen második esetben mérhető átviteli függvényt $A_2(f)$ -el jelöljük.

3. *Interaurális*: A két hallójáratban fellépő hangnyomást veti össze. Mindkét hallójáratban azonos időben kell mérni. Ez a harmadik $A_3(f)$ függvény az első két esetből számolható is:

$$A_3(f)_{\Phi=30} = \frac{A_2(f)_{\Phi=330}}{A_2(f)_{\Phi=30}}, \text{ ami nem más, mint a 330 fokhoz tartozó monaurális átviteli}$$

függvény és a 30 fokhoz tartozó függvény értékének hányadosa. Az előzőekben felhasznált átviteli függvény általános alakja:

$$A(f) = |A(f)| \cdot e^{-j\theta} ; \Delta L = 20 \cdot \log |A(f)| ; \tau = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(f)}{df}$$

Ezek után lehet felvenni a „hallhatósági függvényt”, azaz a hallásküszöb frekvenciafüggését ill. az azonos hangosságú pontok frekvenciamenetét (Fletcher-Munson). A monaurális átviteli függvény adódik a küszöbgörbék különbségeként ill. az azonos hangosságú görbéknek a referenciától való eltéréséből.

A hallásküszöb felvételének egy jó módszere a Békésy-féle lengőkiegyenlítéses vizsgálat: a hangerőt egyenletesen növeljük, amíg a kísérleti személy gombnyomással jelzi, hogy a hangot meghallotta. A gomb nyomva tartásával a hangerő csökkenni kezd mindaddig, amíg a megfigyelő azt már nem hallja. Ekkor elengedi a gombot, és a hangerőt újra növeli... Az eljárást ismételve a küszöbszint meghatározható (a keresett szint körül fog ingadozni).

A fül különböző, a beesési iránytól és távolságtól függő átviteli függvényt produkál. A második és harmadik-féle átviteli függvényt süketszobában kell végezni.

Lehet jelfüggő mérést is végezni: impulzusgerjesztés hatására impulzusválaszt vizsgálhatunk. Az átviteli függvény egyenlő a kimeneti jel időfüggvényének Fourier-transzformáltjának és a bemeneti jel Fourier-transzformáltjának hányadosával. Az FFT minden esetben nagy segítséget adhat a sok számolás miatt.

2.2.4. A hangteret befolyásoló paraméterek mérése

Megállapíthattuk tehát, hogy a legfontosabb jel a dobhártyán a térbeli hallás szempontjából a hangnyomás. A csonthallás ellenben, melynek a küszöbszintje kb. 50 dB-lel van a légvezetési felett, nem olyan lényeges. Ezért a külső fül átviteli függvényének mérése fontos feladat. Létezik olyan mérés, is ami egyszerre méri a dobhártya impedanciát és az átviteli függvényt is. Újabb megfigyelés, hogy a külső fül iránykarakterisztikája a dobhártya impedanciájától független.

A külső fül átviteli függvényének mérését szondamikrofonnal (speciális kondenzátormikrofonnal), és számítógép segítségével végzik. A szondamikrofon tulajdonságai: nagyfrekvencián rossz jel-zaj-viszony, és mechanikai érzékenység. Ha a polarizációs feszültséget növeljük, ezek a hátrányok csökkennek. Ha nem a dobhártyán mérnek, egy kisebb méretű hallójáratba illeszthető kondenzátormikrofon is alkalmas. Ennek elégséges a jel-zaj-viszonya, de jobban zavarja a teret a hallójáratban, noha ez iránykarakterisztika mérésnél nem lényeges.

A mérést kellően szélessávú, rövid, nullátmenettel nem rendelkező impulzusokkal jó végezni. Hátránya, hogy a jel hamar lecseng nullára, ezért a jel-zaj-viszony romlik. Ezt küszöböli ki a Hudde-módszer, ami tesztjelként periodikus impulzussorozatot használ, melynek teljesítménye időben egyenletesen szét van osztva.

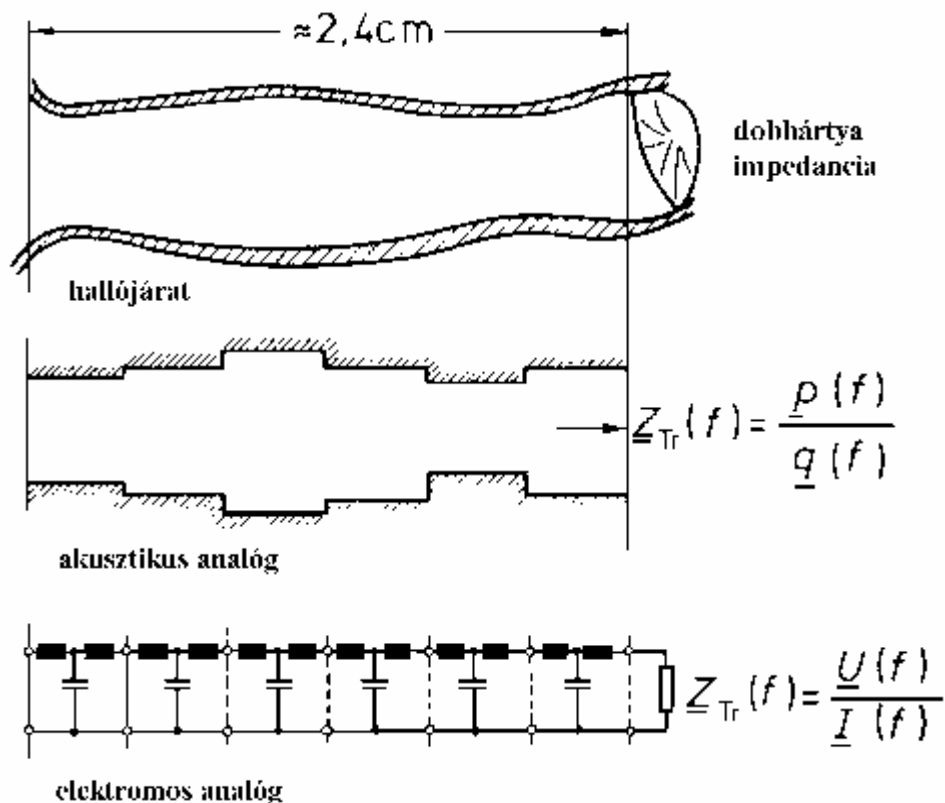
A méréseket többször végezzük el, és az eredményeket megfelelően átlagoljuk. A szokásos átlagolási eljárások nem mindig használhatóak, hiszen éppen a csúcsok laposodnak el, és a lényeges információt veszítjük el. Ezért (pl. teljesítmény alapján) spektrális átlagolásokat is használunk.

A dobhártya impedanciáját 20 kHz-ig is képesek vagyunk mérni. Mint ismert, egy akusztikailag szűk csőben - ahol a hullám csak a cső tengelyének irányában terjedhet - a hangnyomás relatív eloszlása csak a cső geometriai méreteitől és a lezárástól függ. Azaz a cső adataiból és két tetszőleges pont között mért átviteli függvényből a lezárás számítható (impulzusjel gerjesztés esetén).

A hallójárat modellezésére több modell készült:

Állandó A0 keresztmetszet feltételezése. Ekkor az impedancia képlete viszonylag egyszerű, azonban hibás, hiszen A0 helyfüggően változik, melyet sok kis állandó keresztmetszetű cső egymásután rakásával képzelhetünk el.

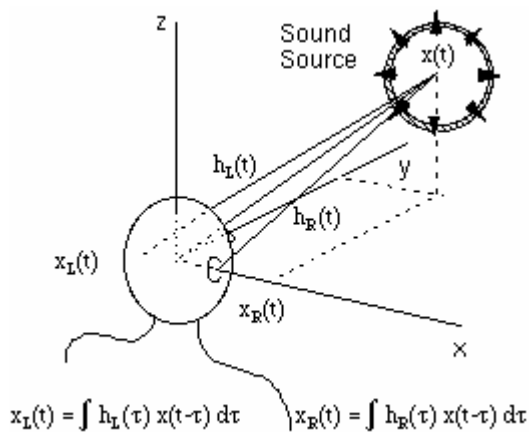
Két ilyen cső átviteli függvényének a mérésével becsülhetjük az A(l) függvényt, azaz a keresztmetszet változását a hallójárat mentén, amelyből a dobhártya impedancia közelítőleg kiszámolható. Szükség van a hangnyomásra a bejáratnál, és a dobhártya előtt, valamint meg kell mérni pl. a cső felénél. Ebből A(l) becsülhető, és végül az impedancia is (1.6.ábra).



1.6.ábra. A hallójárat, és akusztikai valamint elektromos analógja [8].

Az átviteli függvény analízise során állapítható meg, hogy a hang a forrástól a dobhártyáig lineáris torzítást szenved (amplitúdó- és fázisspektrum változás). Ezek azok a hatások, melyeket a külső fül átviteli függvényével (HRTF) írunk le. Okai az árnyékolás, a reflexiók és az elhajlási jelenségek a fejnél, valamint a fülkagylónál, és természetesen a fülben kialakuló rezonanciák. A méretekből adódóan a fej 500 Hz-től, a kagyló 1.5 kHz-től, a hallójárat pedig 3 kHz felett okoz torzítást. A HRTF függvények mellett a belőlük számolt HRIR (Head Related Impulse Response) függvények is hordoznak információt (1.7.ábra), de az időtartományban (a rendszer fázisviszonyait vizsgálhatjuk [7]). A fáziskarakterisztika deriváltját, mely bizonyos esetekben a fázisinformációnál szemléletesebben hordozza az információt, (csoport)futásiidőnek vagy más néven burkolókésleltetésnek nevezzük:

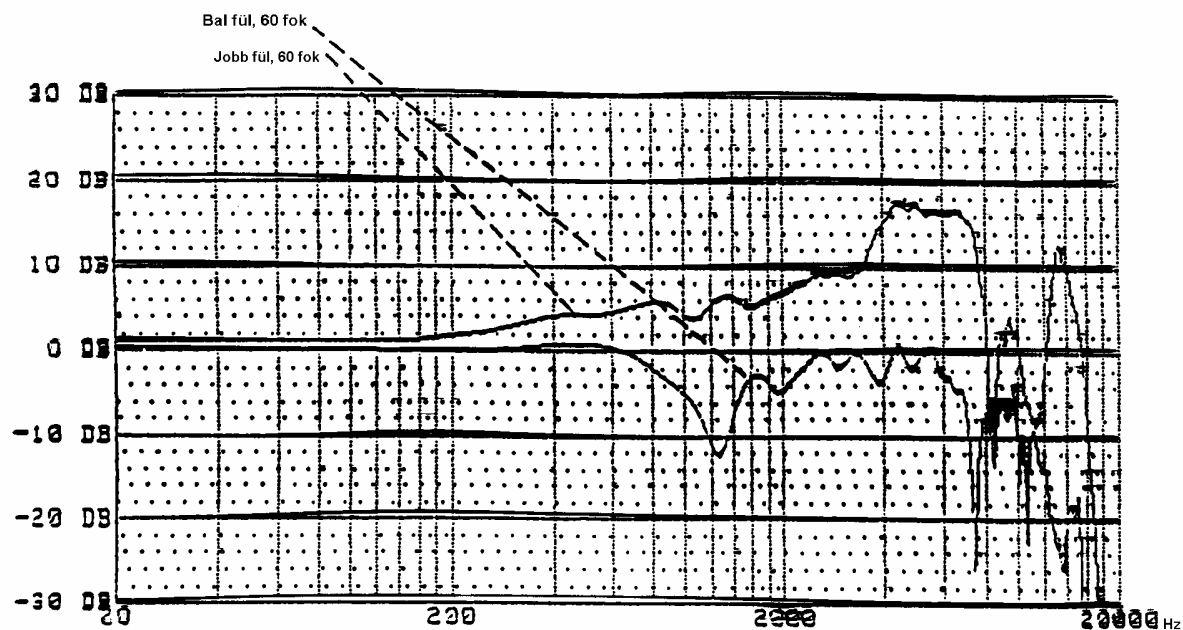
$$\tau(f) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \Phi(f)}{\partial f}.$$



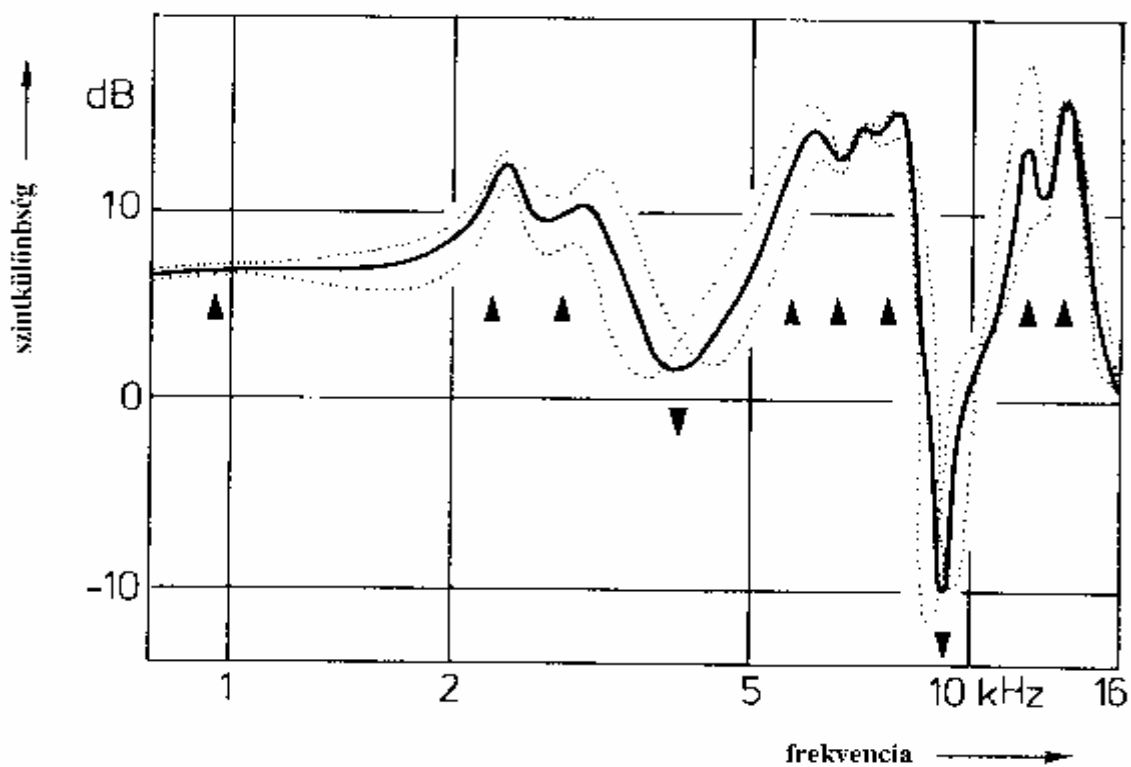
1.7.ábra. Az $x(t)$ hangforrás által keltetett hangnyomást a dobhártyán megkapjuk, ha ismerjük a $h(t)$ impulzusválaszt a forrástól a dobhártyáig. Ez a HRIR, és $H(f)$ Fourier-transzformáltja a HRTF. A HRTF tartalmaz mindent, ami a forrás lokalizálhatóságához szükséges, ezért ha ismerjük mindkét fülhöz a HRTF függvényt, pontos binaurális jelet lehet szintetizálni egy monaurális forrásból [26].

A külső fül és a hallójárat az, mely a HRTF-ket alapjaiban meghatározza. Emberi fejen készült mérésnél a hallójáratban elhelyezett mikrofon a teret mindenképpen zavarja, és a frekvenciaátvittele sem egyezik meg a dobhártyával. Minden vibráció más lesz a hallójáratban, ha ott mikrofon van elhelyezve, ezért az ilyen HRTF mérések nem megfelelőek. A folyadékkal töltött belső fül hatását ezen függvények *egyáltalán nem jellemzik*, csak a külső felépítésről, és a hallójáratban zajló folyamatokról hordoznak információt [19].

A HRTF bonyolult függvénye a tér három koordinátájának és a frekvenciának. A méréseket 1 m. forrás távolság felett (távoltér) végzik, mert ekkor a függés az elfordulási és az emelkedési szögre, valamint a frekvenciára korlátozódik (1.8.-1.9.ábra) [26],[1].



1.8.ábra. Példa mért HRTF függvényre. 60 fokos elfordulási szög esetén, a hangszóróhoz közelebbi fül átvitele erősebb. A szokásos ábrázolási mód a log-log skála [17].



1.9.ábra. Struktúráisan átlagolt szabadtéri (free-field) külső fül átviteli függvények „szemben” irányból. A mérés helye: 2 mm-re ill. 4 mm.-re a hallójáratban [8].

A hallójárat a bejáratától a dobhártyáig egydimenziós hullámterjedést reprezentál, a hangbeesési iránytól és a hangforrás távolságától függetlenül. A

méréseket 5 kHz alatt végezzük, mert e fölött $A(l)$ változása számottevő és a veszteségektől sem tekinthetünk el.

Íránykarakterisztika-vizsgálatoknál a fülkagyló, a fej és esetenként a felsőtest hatását is figyelembe kell venni. Az íránykarakterisztikákat legerősebben a fülkagyló határozza meg, hatása 2 kHz felett jelentős igazán. Fizikai tény, hogy egy hullám, ha $\lambda/4$ -nél kisebb átmérőjű résen halad át, újra gömbhullámú forrásként fog viselkedni, azaz „elfelejti”, hogy honnan jött (Huygens-Fresnel törvény). A hallójárat bementén egy kb. fél cm. átmérőjű rés található, azaz a fül kb. 17 kHz-ig teljesíti ezt a feltételt. Ebből a tényből következik, hogy a (blokkolt) hallójárat bementén felfogott akusztikai hullám teljes térbeli információtartalommal rendelkezik, és nem szükséges a dobhártyán mérni, mert ez a jel ebből a szempontból egyenértékű vele. Az eltérő irányból és távolságból érkező akusztikai hullámokban található térbeli információkülönbségek a hallójáratban már nem változnak, odáig viszont erőteljesen [12]. A kagyló torzítása a mediális síkban történő irányhallás esetén a legjelentősebb (ha kitömjük, zavar lép fel).

2.3. Az azonos füljelek kiértékelése

Megállapítottuk, hogy a hangjel úton a dobhártya felé *lineáris torzítást* szenved, ami erősen függ a forrás helyétől, bár ez sokszor nem azonos a hallásérzet kialakulásának helyével. Nézzük most meg, milyen jellemzői vannak a füljelnek, melyet a hallás ki tud értékelni, és a szükséges információt ki tudja nyerni belőlük.

Monaurális jellemzők azok, melyek az egyfülű hallásra jellemzőek - tehát egyik fülükre süketek is fel tudják dolgozni -, és az érzet helyének kialakulásában döntően fontosak. Ilyen jellemzők minden hangjelben vannak, belőlük az érzet távolságára, emelkedési szögére, valamint az előre/hátra irányok meghatározhatóságára következtethetünk. Fejhallgatón keresztüli mérésre a diotikus eljárás alkalmazható, mikor ugyan mindkét fejhallgató szól, de ugyanazt a jelet sugározzák. Monotikusnak nevezzük azt az eljárást, ha csak az egyik fejhallgató sugároz jelet.

Interaurális jellemző csak a kétfülűek számára hasznosítható. Ezek az ismérvek a két füljel eltérését ill. viselkedésüket jellemzi. Ha változik az interaurális jellemző, mindig változik a monaurális is. A valóságban soha nem fordul elő, hogy ezek külön lépnek fel, hanem mindig együtt. A fejhallgatón keresztül történő interaurális vizsgálatokat ún. dichotikus módszerrel végzik, ami azt jelenti, hogy mindkét fejhallgató szól, és a jelek is különbözőek (hasonlóan a sztereóhoz, a bal fül a bal, a jobb fül a jobb csatorna jelét kapja).

Ha a forrást a mediális síkban mozgatjuk, csak a monaurális jellemzők változnak, az interaurális nem (konstans és értéke közelítőleg nulla). Ha mindkét fül azonos gerjesztést kap, *a hallásérzet mindig a mediális síkban lép fel*, még ha a forrás nem is ott van, pontosan azért, mert csak monaurális hatás van. Ez azonban csak egy elméleti elképzelés, mert ideálisan szimmetrikus fej és egy mediális síkbeli forrás esetén lépne fel egzaktnál azonos két füljel, de ekkor is van interaurális jellemző, méghozzá pontosan az, hogy a két füljel között a szinteltérés nulla.

Nem szimmetrikus fej esetén különböző füljelek lépnek fel, és korrekt lokalizáció történik. Dichotikus esetben a lokalizáció jobb, mert az ilyen jelek sokkal kellemesebbek a fülnek.

Ideális esetben tehát a két fül akkor kap azonos gerjesztést (hangjelet), ha a forrás (egy darab) a mediális síkban helyezkedik el. A kísérleti személy fejmozgását megengedve is végeztek kísérleteket: egy 300 ms. időtartamú szinuszjel esetén a lokalizációs bizonytalanságot a fej rögzített volta nem befolyásolja, de hosszabb jeleknél már szükséges a rögzítés, ha helyes eredményeket akarunk kapni. A kísérletek azt mutatták, hogy ha a fejet fixen kell tartani, akkor az 1°-nál nagyobb fejelfordulás valószínűsége kisebb, mint 5%. Ebből az következik, hogy 1 s.-nál rövidebb jelek esetén nem kell tényleges rögzítés, elég, ha a kísérleti személy a fejét mozdulatlanul tartja [1].

Itt említjük még meg a magasabb frekvenciák szerepét: a hangbeesés iránya jobban egyezik az érzet irányával, ha 5 kHz feletti nagyfrekvenciás komponensek is jelen vannak. A lokalizációs bizonytalanság (fehér zajnál) $\pm 4^\circ$ és $\pm 10^\circ$ helyett a kétszeresére is megnő, ha 4 kHz-nél azt szűrővel levágjuk. Valószínűleg a füljel spektrumában megjelenő csúcsok és beszakadások azok, melyek fontosak az érzet irányának kialakulásában. Egy szélessávú jel *több információt hordoz a hangforrás helyéről*, mint egy keskenysávú.

2.3.1. Irányhallás vizsgálat a mediális síkban

A mediális síkban való irányhallás-vizsgálatoknál figyelembe vesszük, hogy (ideálisan) *interaaurális jellemzők nincsenek*. A hallásérzet és a hang beesési irányának egybeesése jelfüggő: szélessávú (főleg hosszan tartott vagy ismétlődő) jelek esetén az egybeesés elég jó. Végző soron az érzet iránya a füljel spektrumától függ. Érdekes, hogy konstans, szélessávú jel esetén a forrás helyét be lehet „taníttatni” a rutinos megfigyelővel, mert az ember képes tapasztalati úton következtetést levonni a forrás helyéről a hang „csengése” alapján.

A fülkagyló szűrő szerepét is meg kell említeni. A normál fülkagyló helyes előre-hátra helymeghatározást tesz lehetővé, de ha kagylós toldalékot illesztünk bele, akkor a toldalék szájának iránya fogja meghatározni az érzet helyét (ha hátra néz, fordítás lesz). Egy vizsgálat során a hallójárat jelét felvették (azt, amit a fülkagyló már megszűrte), és eltérő sorrendben lejátszva is ugyanaz az érzet alakult ki, mint felvételkor.

A megfigyelések alapján a következő megállapítások tehetők:

Az érzet iránya megegyezik a hangbeesés irányával, ha a jel

1. szélessávú, és 7 kHz-nél nagyobb komponenseket is tartalmaz. A lokalizációs bizonytalanság 4°-ig csökken, ha változtatjuk a forrás irányát (emelkedési szögét).

2. szélessávú, és (pl. nagyfrekvenciás zaj) alsó határfrekvenciája 2-8 kHz között van. Kisfrekvenciás zaj esetén *irányinverzió* léphet fel a felső határfrekvenciától függően (impulzus jelek esetén gyakoribb).

A jel „előéletének” szerepe abban nyilvánul meg, hogy a jeleket be lehet taníttatni, ill. adaptálni a személyekhez, de nem minden jeltípusnál. Általában az *ismert jelek helye jobban meghatározható*. Más a helyzet fejhallgató mérésnél, ahol a

fülkagyló nem szűr, és a *füljel nem tartalmaz helyinformációt*. Ilyenkor az érzet megjelenhet előlről is, és hátulról is, ami az egyén akaratától függ (sőt a fej közepén is, ld. később).

Az eredmény: sokféle jeltípusnál a hallásérzet spontán a hullámbeesés irányában képződik, nem ismert jelek esetén is. Ha a jel olyan, hogy kevés, vagy ellentmondásos információ érkezik a forrás helyéről, az érzet fellépésének helye függ attól, hogy a jel ismert-e, mit vár a megfigyelő, mit szokott meg...stb. Ekkor az ellentmondásos információk közül *csak arra van tekintettel a hallás, amelyek értelmes, elfogadható helymeghatározást tesznek lehetővé* az adott környezetben. Ez szubjektív emberi tulajdonság. Kérdés, hogy a füljelnek mely specifikus tulajdonságai azok, amelyek az érzet irányával ténylegesen összefüggnek?

Fontos az összefüggés a frekvenciával: a *magasabb hangokat térben feljebb érzékeljük, mint a mélyeket*. Úgyis mondhatnók, hogy *csökkenő frekvencia esetén az érzet helye süllyed, emelkedő esetén emelkedik*. A frekvencia ebből a szempontból *sokkal fontosabb, mint a szint vagy az irány*.

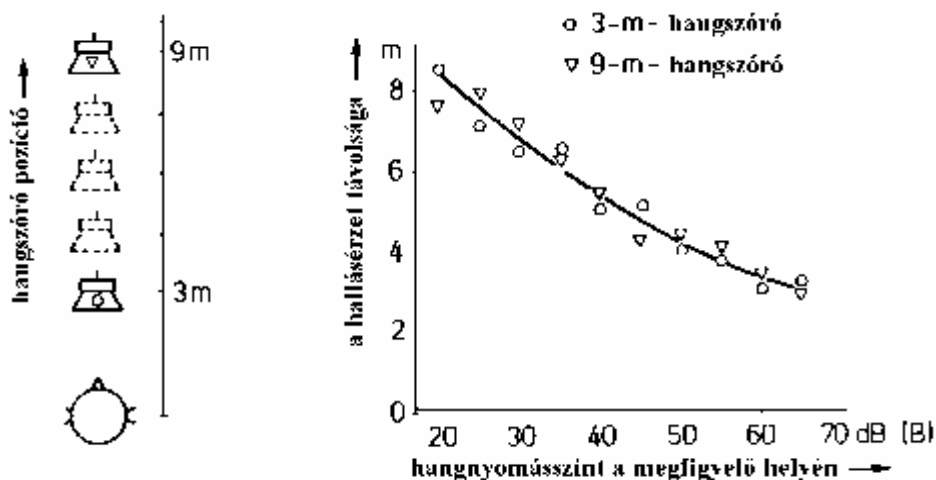
2.3.2. Távolsághallás és fejközép-lokalizáció

Ebben a részben a távolsághallással és egy különleges jelenséggel, a fejbeni lokalizálással foglalkozunk.

Egy kísérleti elrendezés során a hangszórót közelítették ill. távolították a megfigyelőtől, de az a mediális síkban maradt. A mozgással együtt természetesen az érzet is mozgott, és a távolság függvényében az alábbi jelenségeket figyelték meg.

Kis távolságnál (kevesebb, mint 3 m.) *elhajlás lép fel*, mert nem síkhullámok érkeznek be, és a fej a hullámokat befolyásolja. A találkozó hullámfrontok a fej méretével összemérhetők. A fej- és a fülkagyló lineáris torzításai a távolságtól függően változnak, így a füljel spektruma és szintje is változik. A függés 600 Hz-ig kb. megfelel az $1/r$ törvénynek. A futási idő a 8 ms. konstans helyett ± 0.5 ms.-al ingadozik a frekvencia függvényében. A lineáris torzítási jellemzőket is kiértékeli a fül, bár 25 cm.-nél nagyobb távolság esetén ezek már nem túl jelentősek.

Közepes távolság esetén (a fejtől 3-15 m.-re, stacioner jel esetén) csak a füljel *hangnyomásszintje függ a távolságtól*. Szabad térben ez az $1/r$ törvénynek megfelelően: a távolság duplázása 6 dB-es szintcsökkenést okoz (1.10.ábra).

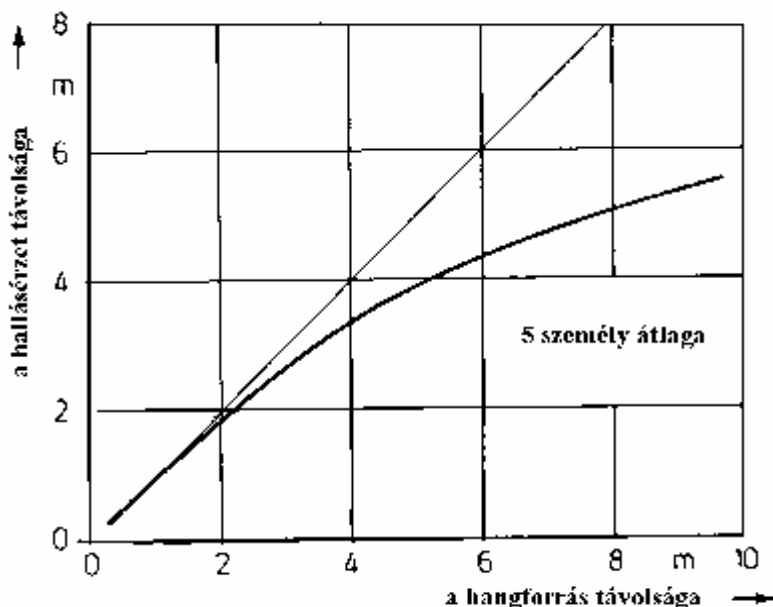


1.10.ábra. Tipikus görbe, mely a hallásérzet távolságának hangnyomásszinttől való függését mutatja. Beszédjelre, 5 alannyal, 3-9m. között 5 db. (látható) hangszóróval, süket szobában [1].

Nagyobb távolság (15 m. felett) esetén a levegő „torzítása” is számottevővé válik. Az $1/r$ törvény mellett a távolságtól függő légszillapítás is van (ami frekvenciafüggő: nagyfrekvencia jobban csillapodik). Ezek szerint a füljel spektruma (nem csak a szintje) is változik a távolság függvényében. A légszillapítás a spektrumra kb. 10 kHz felett okozhat hallható változást.

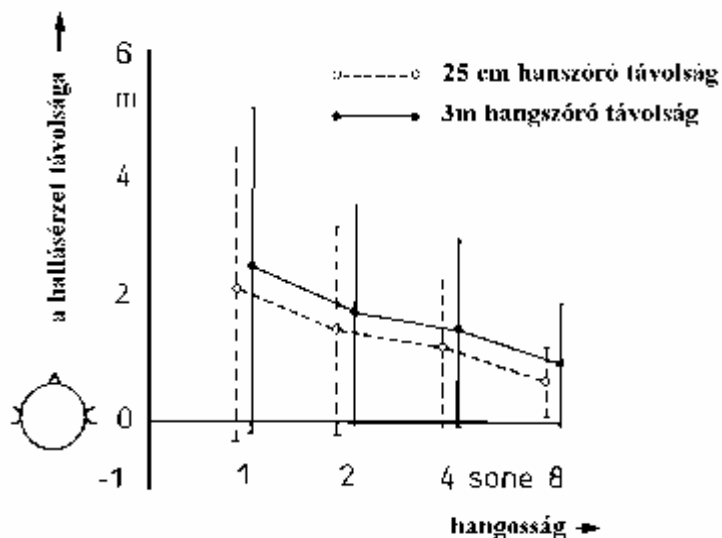
Síkhullámú beesés esetén a távolság növelésével a hangnyomás effektív értéke csökken. Lényeges, hogy a hangnyomás (P) effektív értéke a színeképtől és a hangosságtól is függ. A hangosság növelésével a füljel szintje megnő, de a színekép sötétül (a kisfrekvenciák előjönnek, erősödnek szélessávú jel esetén). Ha közeledik a forrás, az érzet távolsága is csökken, valamint járulékosan a hangossága is megnő, és sötétedik a színeképe. Ezek segédparaméterek a fül számára a hely meghatározásához.

Abban az esetben, ha csak a szint határozza meg az érzet távolságát, észrevehető, hogy a hangforrás távolságának lineáris növekedése, nem lineáris, hanem egyre kevésbé növekvő érzet-távolságot eredményez. A hallástér (akusztikus horizont) kiterjedése tehát korlátozott. Bizonyos forrástávolság felett már nem nő az érzettávolság annyira (1.11.ábra): túl nagy távolságot nem érzékelünk méretarány helyesen, sőt egyre kevésbé a változást magát. (6 dB helyett már 20 dB szintemelkedés kell a távolságérzet megduplázáshoz).



1.11.ábra. Lokalizáció hangforrás- és hallásérzet távolságok között. Természetes beszéd, 5 alannyal süketszobában [1].

Egy vizsgálat során középvezetékben elhelyezett konstans 1 son hangosságú jelet sugároztak ki egy 25 cm.-re, és egy 3 m.-re elhelyezett hangszóróból is (1.12.ábra). A két érzet távolsága kb. 50 cm. volt, ellentétben a források fizikai 275 cm.-es távolságával. (A hangosság duplázása 10 dB-es füljel szintemelkedésnek felel meg.)



1.12.ábra. A hallásérzet távolságának változása a hangosság függvényében. Két különböző hangszórótávolság, fehérzaj gerjesztéssel (27 alany, sötét süketszobában) [1].

Ismert jelek esetén könnyebb az érzetből a forrás helyét megbecsülni, ismeretlen jel esetén már kb. 4 m. felett jelentékeny hibájú a becslés. Bizonyos esetekben a spektrumváltozás nem befolyásolja lényegesen az érzet távolságát.

Külön kell foglalkozni a fejhallgatóval, mert ekkor a fülkagyló nem szűr, és fejhez közeli érzet, vagy káros mellékhatásként *fejközép lokalizáció* alakulhat ki (a továbbiakban: FKL).

Ez a fontos jelenség létrejöhet úgy, hogy a forrás ténylegesen a fejben van (saját hangunk), vagy rossz mellékhatásként torzítatlan fejhallgató átvitelnél, ahol lényeges, hogy mindkét forrás a fülhöz *nagyon közel* legyen. Legerősebb a hatása, ha a fülek olyannyira azonos jelet kapnak, hogy *csak egy egységes hallásérzet alakul ki*. Torzított fejhallgatónál a fejen kívül, de közel és szemben is létrejöhet egy helytelen érzet, amely emelkedő hangosság esetén közeledik. Szabadtéri ill. modellezett szabadtéri jelek esetén nincs FKL, és ismert jelek esetén is ritkábban lép fel.

Érdekesség, hogy nem a fejhallgató visszajátszástól jön létre, hanem már műfejes felvétellel is elő lehet idézni. Egy kísérlet során a műfej felvett jelét visszaadták (nem fejhallgatón) egy megfigyelőnek, minek során természetesen nem lépett fel FKL. Azonban ha a műfej fejhallgatón át kapta a jelét, és ezt a rögzített jelet játszották vissza, a megfigyelőben az érzés fellépett!

A fejhallgató egyéb hátránya, hogy hosszú távon kényelmetlen viselni, és bizonyos esetekben az eleváció-effektus felléphet (ld. később). A legnagyobb hibája azonban, hogy a forrás mindig túl közelinek hat (ténylegesen is közel van a fülhöz), és az a fejben is lokalizálódhat [21].

2.4. A különböző füljelek kiértékelése

Általánosabb esetben a hangforrás nem a mediális síkban van, és a kialakult hallásérzet sem. Ekkor a mediális síkból való balra-jobbra kitérést is megengedjük, és ez azt jelenti, hogy a *két füljel nem azonos*. A térbeli hallásérzet a *füljelek különbségén alapul*, melynek csak bizonyos részeit értékeli ki a hallás. Ilyen tulajdonságok:

1. Az érzet fellépésének *időpontjára* vonatkozólag a füljelek különbsége. Olyan jelkülönbségek ezek, amelyeket a fázismenet ír le, és *interaurális időkülönbség*-nek nevezünk. Arról van szó, hogy a két füljel azért nem azonos, mert a hang beérkezése az egyik fülbe nem azonos időben, hanem bizonyos τ idővel később történik, mint a másikba. Tisztán interaurális időkülönbségről akkor beszélünk, ha a két füljel szintje azonos marad.

2. A másik eltérés a füljelek különbsége az *átlagos hangnyomásszintre* vonatkozólag, amit az $|A(f)|$ ír le, és *interaurális szintkülönbség*-nek nevezünk. Az eltérés a füljelek között most abból adódik, hogy azok *szintjei* nem azonosak, de azonos időben érkeznek be. Természetesen a valóságban ezen két hatás együttesen lép fel, és csak kísérleti céllal, mesterségesen állítunk elő olyan szituációt, melyben tiszta idő- vagy szinteltérésekkel dolgozunk.

A lokalizáció egy olyan folyamat volt, ami az emelkedési szög, azaz a mediális síkbeli kitérésre volt jellemző, és a füljel monaurális jellemzőivel volt kapcsolatban. A *laterizáció* hasonló folyamat: egy függvénykapcsolat keresése az érzet oldalirányú kitérése és a füljel bizonyos (interaurális) jellemzői között.

2.4.1. Az interaurális idődifferencia

Az interaurális idődifferencia azt jelenti, hogy a jelek *egymáshoz képest időben eltoltak*. Az oldalirány-hallás szempontjából ez a leglényegesebb füljel-jellemző.

Amelyik fülhöz hamarabb ér a jel, a hallásérzet a mediális síkból arrafelé mozdul el. A maximális útkülönbség, ami még érzékelhető 21 cm. A hallás képes a füljel impulzus jellegű részeinek fellépési időpontját pontosan meghatározni. Az érzet 180°-os fázisfordítású füljel esetén pontatlan, feltételezhetőleg azért, mert az érzet egy sor térben szomszédos részre esik szét. A hallás tehát a füljel egyes spektrális komponenseit az interaurális idődifferencia függvényében szétválasztva értékeli ki.

Tiszta (szinuszos) jelek esetén létezik egy ingerküszöb, és csak akkor van inger a belső fülben, ha a jel periódusonként egyszer ezt átlépi. Ezek különböző időben vannak a két fülben, és a hallás ezt a kétértelműséget regisztrálja, két érzetet keltve.

Ha a két fül frekvenciában közeli jelet kap - olyan érzet alakul ki, ami a különbség ütemében a fejben ide-oda ingadozik. Létezik a frekvenciában egy olyan küszöb 1.5-1.6 kHz-en, ami alapjaiban választja szét a hangjeleket a kiértékelés szempontjából. A későbbiekben látni fogjuk, hogy a jel spektrális tartalma alapján eltérően értékelődnek ki a füljelek, ha azok tartalmaznak 1600 Hz feletti komponenseket, mint azok melyek nem.

Kérdés, miként befolyásolja az érzékelést a különböző frekvenciájú hangok burkolója? Megállapítható, hogy a burkoló kiértékelése segíthet. Különböző vivőfrekvenciájú jelek esetén (pl. keskenysávú zaj 1.6 kHz alatt) *a burkolótól függően* különböző oldalkitérést érzékelhetünk. Ha nincs 1.6 kHz alatti spektrumkomponens, az eltolás a mikrostruktúrában nem számít, *csak a burkoló*. Ezért különböző frekvenciájú vivő, de ugyanaz a burkoló okozhat ugyanolyan érzetet. *A laterizáció 1.6 kHz felett a burkoló alapján történik.*

A laterizáció függ attól, hogy a vivő 1.6 kHz alatt van-e, és a burkoló hullámosságától is, azaz mennyire meredek változások vannak benne. Burkolókiértékelés már 500 Hz-en is van, és ha a frekvencia nő, ez egyre jobban dominál a kiértékelés során.

Értelmezünk laterizációs bizonytalanságot is (interaurális idődifferencia esetén), mely csökken emelkedő szint és növekvő jelidőtartam esetén.

2.4.2. Az interaurális szinteltérés

Tisztán interaurális szintkülönbségek esetén a helyzet olyan, mintha a *füljelek csakis a szintjükben térnének el egymástól*. Úgyis elképzelhetjük, hogy ugyanazt a jelet vezetjük a két fülhöz, és mindegyikhez állítható erősítést iktatunk be. Azonos szint esetén természetesen az érzet a mediális síkban lép fel, de *ha az egyik nagyobb, akkor az érzet arrafelé vándorol* (ekkor van oldalirányú hallásérzet kitérését okozó interaurális szintkülönbség). Ezen alapul az ún. irányhallás intenzitásdifferencia elmélet, ami pontosan ezt mondja ki.

Ha 15-20 dB-es szintkülönbséget állítunk elő, az már a „teljesen oldalt” érzést váltja ki: gyakorlatilag csak az erősebbet halljuk. Ilyen nagy különbségek esetén a hallásérzet „szélessége”, és vele együtt a laterizációs bizonytalanság is megnő, főleg kisfrekvencián. Ahhoz, hogy ezt a szélső hatást elérjük kb. lineáris interaurális szintkülönbség változás kell, ugyanakkor figyelembe kell venni, hogy konstans szintkülönbség esetén a laterizáció frekvenciafüggő.

Gyakorlott kísérleti személyek azt mondják, hogy 1.6 kHz alatti jeleknél két érzet alakul ki: az egyik a fej közepén, a másik előtte, amely emelkedő szint esetén elvándorol, és csak *felületes hallgatás* okoz közös érzetet.

Megfigyelhető a *laterizáció idővariáns* jellege is: hosszabb idő után a hallás elfárad, és „romlik”; az ismételt adaptáció perceként vesz igénybe.

2.4.3. Az együttes kiértékelés és a burkoló szerepe

A valóságban az interaurális időeltérések és szintkülönbségek *együtt* lépnek fel. A hallás képes az *időeltolódást érzékelni úgy a vivőhullámban, mind a burkolóban*. Általánosságban elmondható, hogy *20-1600 Hz-ig a vivő a lényeges, 1600-20 kHz-ig inkább a burkoló*. A szintkülönbség *a teljes 20-20 kHz tartományban* számottevő, és 1.6 kHz felett inkább ez, mint az időeltolás jelentős.

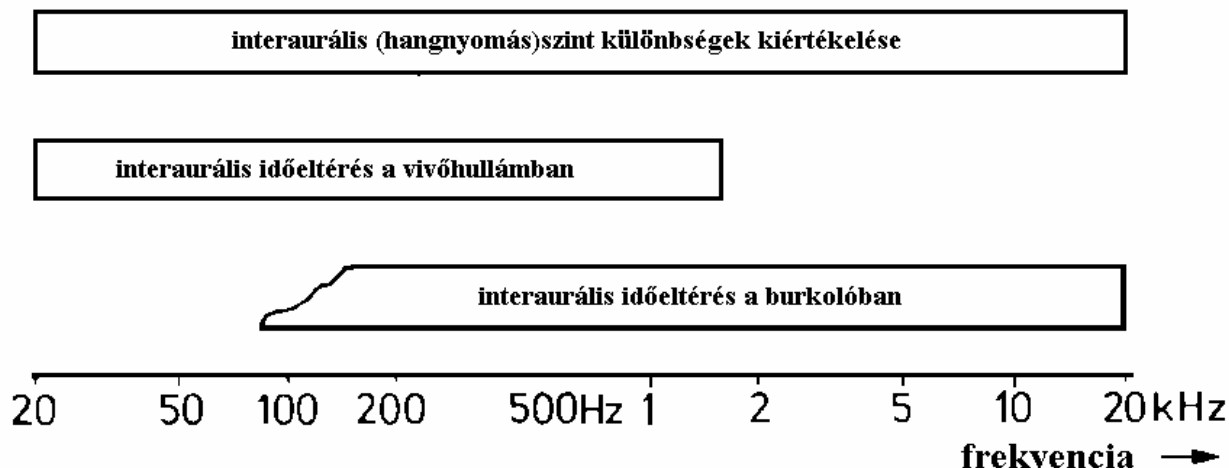
Ha időeltolás és szinteltérés is jelen van, az érzet kitérése nagyobb lehet. A kérdés, hogy mekkora (dB) szintkülönbség ill. időeltolás kell egyedül ekkor ahhoz, hogy az érzet a mediális síkba visszatérjen?

Trading-hatásnak hívjuk, mikor ezen két jelenség egymásra hatását vizsgáljuk. A jelenséget frekvenciafüggő ún. Trading-görbékkel szemléltethetjük. 1.6 kHz feletti jeleknél ezek erősen függenek a hangerőtől: emelkedő hangerőhöz laposabb görbe tartozik.

Összefoglalva a laterizációra vonatkozó ismereteket: a hallás minimum két, *független kiértékelő mechanizmussal* rendelkezik: az első az interaurális időeltolást értékeli ki a füljel vivőjében, ha a jelnek nincs 1.6 kHz feletti része. A második az interaurális szintkülönbségeket észleli ill. a füljel burkolójának interaurális időeltolását. Ez akkor dominál, ha jel lényeges része 1.6 kHz felett van. Ezen második idővariáns, az elsőnél ez nem bizonyított. Relatív jelentőségük változó.

Mindezek a laterizációra vonatkoztak, lokalizáció esetén az irányhallás a szabadtérben annyiban módosul, hogy mivel a valós jelek többsége tartalmaz 1.6 kHz feletti komponenseket, ezért a *második kiértékelő mechanizmus szerepe* lesz lényegesebb.

Az interaurális szintkülönbségek 20 Hz-20 kHz-ig, az interaurális idődifferencia a finomstruktúrában 1.6 kHz-ig, a burkolóban 150 Hz-20 kHz-ig jelentős (1.13.ábra). Ezek azok a jellemzők melyek az oldalirányú (laterizáció) érzetkítéshez vezetnek.



1.13.ábra. Az interaurális jellemzők kiértékelésének súlya a teljes frekvenciatartományban [8].

A hallás a két füljelet keskenysávú részekre bontja, és úgy hasonlítja őket össze. Ha nem túl nagy a két jel között az eltérés egységes érzetként kezeli. Ha túl nagy az eltérés, akkor ezt két különböző, egymástól független forrás jeleként fogja a hallás érzékelni és kezelni. A kérdés, hogy hol van, és mekkora az átmeneti tartomány?

Újabb mérési eredmények azt mutatják, hogy 1.5 kHz feletti burkolókiértékelés esetén ugyanolyan kicsi laterizációs bizonytalanság van, mint 1.5 kHz alatt a finom struktúrájú kiértékelés esetén. A kisfrekvenciás jelek a belső fülben „egyenirányítódnak” (jobban felismerhető időjeleket tartalmaznak), ellentétben a nagyfrekvenciással, melynek burkolója teljesen megmarad.

Korábban úgy hitték, hogy egy időállandóval jellemezhető a folyamat, ma már tudjuk, hogy két (T_1 és T_2) állandó létezik.

A lassú irányváltozásokat a fül egy ideig még tudja követni, majd ha ez gyorsul olyan érzés alakul ki, mintha a forrás jobbra-balra „ugrálna”, végül a nagyon gyors változás diffúz hangtér kialakulását okozza az agyban.

Irányváltozás-érzékelési küszöbnek nevezzük azt a $T_2=100-200$ ms. időállandót, melynél a hallás számára feldolgozható „forrás a bal oldalt” ill. „forrás a jobb oldalt” érzetét az ilyen pontosan be nem határolható „a forrás ide-oda ugrál” érzése váltja fel. Ha a T (az impulzus távolsága) tovább csökken, diffúz hangtér érzete alakul ki. Ez a másik $T_1=1.5-3.5$ ms. időállandó.

2.5. További paraméterek

Idáig csak a hallásérzet iránya és távolsága, valamint a dobhártya jelének tulajdonságai között kerestük a kapcsolatot. Más, az érzet helyét befolyásoló jellemzőket nem vizsgáltunk, és a fej rögzítve volt ez idáig.

Megállapíthattuk, hogy a monaurális jellemzők fontosak abban, hogy a mediális síkban az irányokat megkülönböztessük, és ezáltal az érzet emelkedési szögét és távolságát meghatározzuk. Az interaurális jellemzők szerepe az oldalirányú kitérésnél volt jelentős.

Ha a fej forgatását, és a látást is megengedjük sokkal több új információhoz juthatunk a forrásról, mert visszacsatolás jön létre.

2.5.1. A fej mozgatása

A fej forgatásakor az érzetben *változás áll be*. Változik a hangerő és a hangszín, amelyből új információkat nyerünk. A fej mozgatásának kétféle típusát különböztetjük meg: az egyik a spontán, *ösztönösen* történő odafordulás a valószínűsíthető forrás felé. Feltételezzük, hogy ez esetben már a fordulás előtt is *elegendő információ állt rendelkezésünkre a forrás helyét illetően*. A fordulás után persze a bizonytalanságok csökkennek, mert a forrás bekerül a hallótér legérzékenyebb tartományába. A másik mozgásfajta egy „betájékoztató-odafigyelő” mozgás, ami csak többé-kevésbé tudatos. Ekkor *csak bizonytalan lokalizáció történt*, és azt a mozgás során nyert új információk teszik pontosabbá.

A fej mozgatásának három fajtája van: *forгатás, bólintás, és döntés*. Ezek közül a forгатás a legfontosabb és másodsorban csak a bólintás.

A forгатás segít abban, hogy eldöntsük, a forrás elöl vagy hátul van-e; a döntés abban, hogy az alsó vagy a felső féltekén. Ha a forrás pontosan elöl van, de a fej pontosan oldalra fordult, akkor a füljelek interaurális eltérése a *legnagyobb*, amely nulláról nőtt. Természetesen, ha pontosan felül van a forrás, a forгатás nem használ semmit, nem fogunk új információhoz jutni.

Ha a nyakat is mozgatjuk, lehetséges a fejet a fül tengelye körül mozgatni, de az interaurális jellemzők ekkor nem változnak. A mozgást befejezve az *érzet iránya szinte mindig egyezik a forrás irányával, és az így kinyert információ már megmarad*, dominál a monaurális jellemzőkkel szemben: hiába fixálják a fejet ezután, ha már tudjuk hogy hol a forrás, akkor is onnan halljuk, holott elméletileg nem onnan várható.

2.5.2. A látás és a csonthallás szerepe

A lényeges hallásérzet-jellemzők egy forrás esetén tehát a monaurális és interaurális jellemzők, valamint ezek változásai a fejmozgatás következtében.

Végül egy megjegyzés a csonthallásról is, amely ritkán, de befolyásolhatja a hallást. Ha a hallójáratot bedugaszolják, akkor a hallásküszöb kb. 40 dB-lel megemelkedik. Ebből következik, hogy a koponya csontjain keresztül vezetett hang legalább 40 dB-lel jobban csillapodik, mint a középső- és a külső fül által vezetett. Ekkora különbség a fő jelhez képest azt jelenti, hogy az normál esetben nem játszik fontos szerepet. Szerepe akkor van, ha a hallójáratban nem levegő, hanem pl. víz van, ezáltal a fő hangbeesés is csillapodik, azaz összemérhetővé válik a csonthallással.

Végül egy érdekes példa a látás döntő szerepére, hogy mennyire képes befolyásolni tudatunkat, megtéveszteni a megfigyelőt: tévénézés közben a bemondó hangját onnan halljuk, ahol a bemondó megjelenik a képernyőn, de csukott szemekkel a hangszórók felől érzékeljük.

3. Több hangforrás és zárt termek vizsgálata

A következőkben olyan hangterekkel foglalkozunk, ahol nem egy, hanem több forrás van, és esetleg zárt (reflexiós) a terem. A jelutat csak a dobhártyáig vizsgáljuk (idáig lineáris), és a dobhártya jele az egyes összetevők összegéből áll

Két jelet *koherensnek* nevezünk, ha azonosak vagy az alábbi tulajdonságokkal rendelkeznek:

1. Különböző amplitúdó, de *azonos hullámforma*, mely azt eredményezi, hogy a közöttük fennálló ΔL szintkülönbség a frekvenciától független.

2. Köztük kölcsönösen torzításmentes és a frekvenciától független *késleltetés* van.

3. Kölcsönös torzításmentes *inverzióban állnak* (burkolójuk megegyezik).

3.1. Két hangforrás és koherens jelek

Tegyük fel, hogy a jelek koherensek, és csak két hangforrás van. Három eset lehetséges.

1. Egy hallásérzet lép fel, amely függ a források helyétől és a jeleiktől.

2. Egy hallásérzet lép fel, de az csak az egyik forrástól függ.

3. Két érzet lép fel, az egyik jele és helye az egyik, a másik a másik forrástól függ nagyjából.

Ezen a jelenségen alapulnak az alábbi új fogalmak.

1. *Összegző lokalizáció*: ha a két jel között csak csekély az idő és/vagy a szinteltérés. Ez az első esetnek felel meg, mert olyan, mintha egy forrás lenne (sztereó alapja).

2. Az *első hullámfront törvénye* (EHT): ha a két forrásjel közötti időeltérés nagyobb, mint 1 ms., az a forrás lesz meghatározó az érzet helyének kialakulásában, amelyik jele előbb érkezik be, és a későt a hallás elnyomja. Ha nagyobb az eltérés a második jelet az első *visszhangjának* (*echó*) fogjuk érzékelni. Túl nagy eltérés esetén pedig *két független* forrásként észleljük. A visszhang, mely az eredeti jel csillapított és késleltetett verziója, a lineáris torzítások egy speciális formája.

3. *Primerhang elnyomás*: Békésy tapasztalta, hogy kölcsönösen késleltetett jelek esetén felléphet egy az EHT-vel ellentétes hatás. Ha az időkülönbség kb. 70 ms., az elsőként beérkező jel nyomódik el, és csak a későbbiek határozzák meg az érzet helyét.

3.1.1. Összegző lokalizáció

Összegző lokalizációt a sztereó alapfelállásban mérünk (a megfigyelő és a két hangszóró egyenlő oldalú háromszöget alkot). Mindkét jel a vízszintes síkban van. Az érzet a két hangszórót összekötő szakasz felezőpontjában alakul ki szemben (szintben is). Ha az egyik hangszóró jele erősebb, az érzet arra felé vándorol.

Egyes mérésekből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy kisfrekvenciás jelek esetén a hangszórójelek intenzitáskülönbsége csak időeltolást okoz a füljelben, és

fordítva: egy futásidő-eltérés a jelben csak intenzitás különbséget okoz. Egyidejű idő- és szinteltérés fellépésekor egyidejű szint- és fázisváltozás jön létre a füljelben.

A standard sztereó elrendezés más vizsgálatok elvégzésére is alkalmas, mint például az *eleváció-effektus*. Ez azt jelenti, hogy egyes esetekben az érzet bizonyos $\delta > 0$ *emelkedési szög alatt van (magasabban)*, nem pedig a vízszintes síkban. Ha közeledünk a két hangszóró felé, *emelkedik* az érzékelt magasság, és pontosan közöttük 90° -on (felfelé) hallatszik. Külön érdekessége, hogy a fej mozgásával, és nélküle is fellép. Oka, hogy a mozgás során az átviteli függvények változnak, és más-más irányávokat emelnek ki, így változó irányokból érkezőnek halljuk a hangot.

A fejhallgatóknál fellépő hibák egy részét a sztereó elrendezés kiküszöbölheti. Az ún. *cross-talk-cancelled-stereo* eljárás során a két hangszórót meghajtó S1 és S2 jelekből egyaránt jut mindkét fülbe. A balba az S1 jelen kívül az S2 „áthallása”, és fordítva, a jobba az S2-n kívül az S1 áthallása is eljut. Mátrixosan megfogalmazva, ha Y1 és Y2 a két fül jele, és H11 a bal fül-bal hangszóró közötti, H12 a bal fül-jobb hangszóró közötti HRTF:

$$\begin{bmatrix} Y1 \\ Y2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H11, H12 \\ H21, H22 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S1 \\ S2 \end{bmatrix}$$

Fejhallgatók esetében az Y1 és Y2 valószínűleg ismert, és a szükséges S1 ill. S2 jel a keresett, mely ezt a hatást létrehozza. Ehhez „csak” invertálni kell a H mátrixot, mely nem triviális feladat (túl hosszú impulzusválasz függvények adódnak, és az eredmény függ a hallgató és a hangszóró relatív helyzetétől is) [21].

Másik kellemetlen jelenség a kialakult érzet „tehetetlensége”, ami akkor lép fel, ha a hangszórók két azonos, *de 180° -os eltérésű* jelet adnak (ha az egyik hangszórót fordított polaritással kötik be). Ilyenkor az *érzet szétesik* legalább két (különböző hangszínű) részre, melyből a *mélyebbik* többé-kevésbé a megfigyelő feje mögötti részén kelt érzetet. Ha a fejet kissé elmozdítjuk a „tömegközéppont” *vele mozdul* azonos irányba egy körív mentén a fej mögött. A *nagyfrekvenciás* rész a két hangszóró között marad, de ez a kevésbé észrevehető. Ha a jel egy 2 kHz határfrekvenciájú felüláteresztő szűrőn megy át nem vesszük észre a polaritásváltást, mert 1.6 kHz felett az interaurális *burkolóeltolás* számít a kiértékelésnél, ami azonos az eredetileg és a polarizáció váltás után is, ellentétben a kisfrekvenciás részekkel, melyek *időeltoláson alapulva értékelődnek* ki. Ez egy káros jelenség, és kellemetlen érzés.

3.1.2. Nem periodikus koherens jelek

Terjesszük ki a sztereó alapfelállást úgy, hogy a jelek továbbra is koherensek legyenek, de nem periodikusak. Láthattuk, ha a jelek azonos időben érkeznek be, és azonos erősségűek, *egy érzet* lép fel szemben. Ha az egyik késleltetése 0-tól eltér, az érzet iránya megváltozik, és a felé a forrás felé vándorol, amelyik a korábban beérkező jelet sugározza. Számértékekkel is szemléltetve elmondható, hogy $\tau = 65 \mu s$. és $1 ms$. közötti *eltolás* esetén az érzet iránya egyenlő a korábban beérkező jelet sugárzó hangszóró irányával, tovább emelve az időt 1 ms. fölé, az irány állandó marad. Ha a

primerhangot S0, a *késleltetett* ST jelöli, elmondhatjuk, hogy S0-ból észre lehet venni ST jelenlétét is.

Ha tovább növeljük τ -t, már változik a hangszín is, és egy küszöb után az érzet szétesik *primerhangra* és annak *visszhangjára*. Az első hullámfront törvényének érvényességi határa 50 ms., ez az ún. *visszhangküszöb*, mert ez alatt *echó* nincs. A küszöb függ a jelfajtától, τ -tól, mindkét jel szintjétől, de a beesési iránytól is.

Szélsőséges esetnek tekinthető, ha a *primerhang* és a *visszavert* azonos szintű. Ilyenkor kétféle hatás léphet fel: *kis visszaverődés-késleltetés* esetén *összegző lokalizáció* lesz, és érvényes az EHT mindaddig, míg az *echóküszöböt* át nem lépjük. Az *echóküszöb* felett a *primerhang* és annak *visszhangja* is jelen van. Túl nagy τ (pár mp.) esetén az *echó* és *primerhang független* lesz, ezért már helytelen a *visszhang* elnevezés is. Bizonyos feltételek esetén előfordulhat, hogy csak a *visszhang* van jelen, a *primer* alig hallható, mert elnyomódik a kiértékelés során.

3.2. Két hangforrás részben vagy teljesen inkoherens jelek esetén

A hangjelek közötti hasonlóság mértékét fizikailag a *koherencia* írja le. Annak eldöntésére, és számszerűsítésére, hogy mennyire hasonlítanak egymásra, létezik egy fizikai mennyiség, a *koherencia fok*, melynek jele k . Ez definíció szerint egyenlő a két jel időfüggvény keresztkorrelációs függvényének abszolút érték maximumával:

$$k = \max / \Phi_{xy}(\tau) / \quad (I.)$$

A 3.1 pontban vizsgált eset a teljes korreláció esete volt ($k=1$), $k=0$ az inkoherens eset, közöttük nevezzük a két jelet részben inkoherensnek. Ilyet létre lehet hozni az eredeti jel lineáris/nemlineáris torzításával vagy zavarjelekkel.

A hallás modellezésére többféle modell is létezik, melyek közül a legismertebb az ún. *korreláció modell*, mely szerint a hallás a *füljelek keresztkorrelációs függvényét* képezi, melynek jellemzői alapján térbeli jellemzőket határoz meg az érzetből.

Aktuális kutatási terület a *binaurális* analízis. Ez nem más, mint *jelfelismerhetőség-vizsgálat* a különböző interaurális jelkülönbségek esetén (elsősorban beszédre zajos környezetben).

Bizonyos párhuzam is vonható a hallás és a jelfeldolgozási folyamatok között: *frekvencia analízis*-a forrás információjának spektrális tartalma, *binaurális összegzés*-térbeli elképzelés, *korreláció-időbeli változás*, *binaurális keresztkorreláció*-helymeghatározás, *interaurális koherencia*-térbeli kiterjedés, *fejforgatás* hatása-kiterjesztett lokalizáció és stabilitás [6].

3.2.1. A koherencia fok szerepe

A kérdés, miként befolyásolja a k az érzet kialakulását. Ha a *koherencia fok* egyenlő eggyel, az érzet közepén alakul ki; ha k csökken, az érzet helye „*kitágul*”. Körülbelül $k=0.85$ esetén az érzet egyre jobban *szétterjed*, $k=0.4$ esetén már szinte

diffúz érzet jön létre. Teljes inkoherencia esetén ($k=0$) az érzet két függetlenre *esik szét*. Röviden azt mondhatjuk, hogy a lokalizációs bizonytalanság nő, ha k csökken.

A fontos az, hogy a hallás képes az interaurálisan *részben koherens füljelekből olyan részeket kinyerni, amelyek koherensek*. Kevésbé jó a lokalizáció, ha maradnak inkoherens részek. Ha kevés, vagy *nincs koherens* rész, minden füljelhez egy különálló érzet társul, és ez a teljes szétesésnek felel meg.

Összesítve: a hallás képes a füljelek interaurális keresztkorreláció analízisére, azaz *interaurálisan koherens* (vagy részben koherens) részek *kinyerésére*. Ezek a lateralizáció szempontjából lényeges információk. További információt (emelkedési szög, távolságok) ez a modell nem biztosít.

3.2.2. A binaurális jelfelismerés

Tapasztalat, hogy társaságban a sok beszélgető ellenére képesek vagyunk valamelyiket kiválasztani, és arra odafigyelni, a többit pedig a beszédérthetőség szempontjából teljesen kiiktatni. Ezt a szakirodalom *Koktélparti-effektus*-nak nevezi. Fontos, hogy két fül szükséges hozzá, mert a fül irányából jön a hasznos jel és a zaj is, amit két füllel könnyebb szétszedni, mint eggyel. Érdekes, hogy ez csak élőben sikerül, ha felvételt készítünk egy sok szereplős beszélgetésről, a felvételből sokkal nehezebb az információt kinyerni.

Ezen tapasztalatok azt mutatták, hogy érdemes az emberi beszéd átvitelét oly módon vizsgálni, hogy annak csak az *érthetőségét* tekintjük paraméternek. Ilyenkor már nem a térbeliség, csak a felismerhetőség a fontos.

Az effektus számszerű leírásához induljunk ki a hasznos jel „hallhatósági küszöb”-éből. Ez beszédjel esetén az érthetőség határa, egyéb jeleknél a hallásküszöb. Ez a szint a hasznos jelnek az a szintje, ahol már éppen kihallatszik a zajból. A monotikus kísérletnél mérhető küszöbszintet tekintjük viszonyítási alapnak, azaz 0 dB-nek. Ezek után bármilyen lejátszási körülmények között megmérhető az aktuális küszöb, melyet relatív egységekben adunk meg.

Az így kapott szinteltérést, ami az adott folyamatra jellemző, az angol szakirodalom *BMLD* (Binaural Masking Level Difference)-nek nevez, és ami speciálisan beszéd esetére a *BILD*. Ez megmondja, hogy az érthetőség mikor emelkedik ki a zajból.

A BMLD csökken, ha a frekvencia nő, vagy a korreláció csökken, és erősen szintfüggő a levegő hatása miatt. A BMLD szempontjából a kisfrekvenciák jelentősebbek, a BILD esetén a nagyfrekvenciák is számítanak.

A BILD-et több módon is lehet mérni. A leggyakoribb a *szótagérthetőség* vizsgálat, ahol önmagukban értelmetlen logatomokat (szótagokat) kell felismerni. Ekkor a BILD = a helyesen felismert szótagok számával %-ban. A *szótagérthetőség szintje*, az a szint, ahol az 50 %-os találat arány van (innen fogva csak tippel a személy alap nélkül, és a találati valószínűség 1/2). További eset lehet a *szó- és mondatérthetőség* vizsgálat is, de ez könnyebb, hiszen értelmes szöveget kell felismerni (a nyelvtudás hibajavító rendszerként működik).

A BILD jellemző értéke 0-3,5 dB körüli, de mindig igaz, hogy a $BILD < BMLD$. Ezt az interaurális időkülönbségek alapján vizsgálták: $\tau=0.5-10$ ms.

között a BILD konstans 3 dB, és $\tau < 0,5$ ms. esetén nullára csökken. A megfelelő BMLD értéke 12-13 dB.

3.3. További binaurális modell vizsgálat

Már említettünk egy binaurális modellt: a keresztkorrelációs függvény modell szerint a hallás a két füljelben az interaurális idődifferenciát kiértékeli, és a koherens részeket azonosítja.

Kérdés, hogy mely részeket kell feltétlenül tartalmaznia egy binaurális jelfeldolgozó modellnek ahhoz, hogy a lehető legjobban átfogóan leírja azt, legalább a binaurális lokalizáció és jelfelismerés szempontjából. Ehhez a rendszert blokkokból építjük fel, melyek megfelelnek a hang beesésétől a binaurális feldolgozásig terjedően a hallás mechanizmusának (1.14.ábra).

A Blokk: a megmért külső fül átviteli függvényt modellező szűrő.

B Blokk: a közép fül átviteli viselkedését leíró szűrő. Ez lényeges lenne, de csak kevés mérési eredmény van ez idáig.

C Blokk: a belső fül funkcióit reprezentáló blokk. Főleg a frekvenciaszelektivitást és a determinisztikus analóg jelek idegi (sztochasztikus) impulzussorozattá alakítását modellezi. Ezek sorba kapcsolt sáváteresztő szűrők. A blokkmodell elsődleges feladata a *csiga* szimulálása. Ez a szerv végzi a spektrális analízist a benne található Corti-szerv segítségével. Ez kapcsolódik a rendkívül érzékeny basilar membránhoz, mely a mechanikai rezgések transzformálását végzi idegi jelekké [3], [19].

D Blokk: Az interaurális idődifferencia kiértékelését, és az interaurálisan koherens jelek (melyek mindkét fülben vannak) azonosítását utánozó függvényblokk. Ezen blokkba az ún. Spike-sor (speciális impulzussorozat) megy be, mely a két belső fülből érkezik.

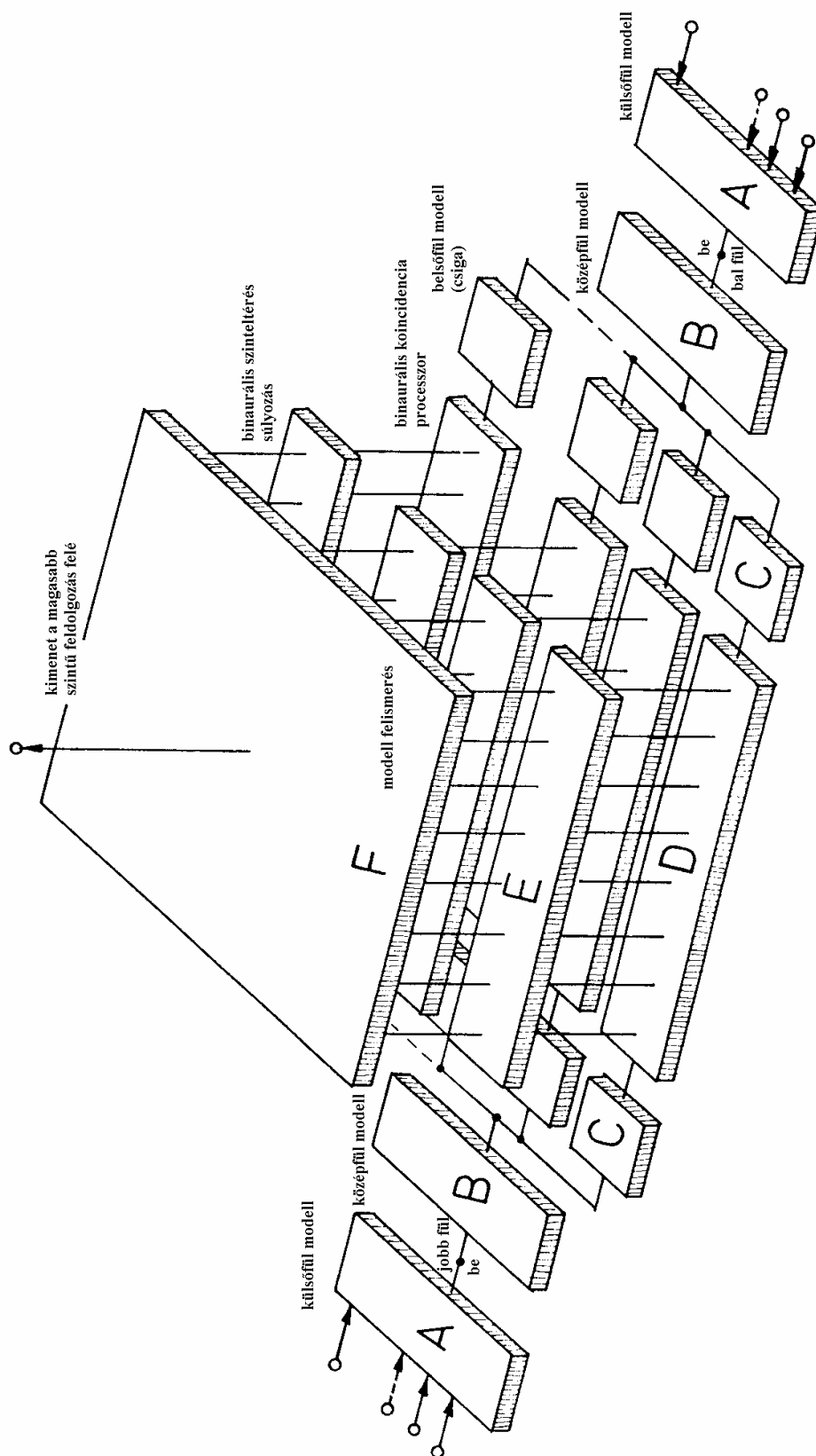
E Blokk: az interaurális szintkülönbségek kiértékelésének blokkja. A keresztkorrelációs függvény mellett szükséges egy minősítő függvény is.

F Blokk: a D és E blokkok együttes feldolgozása, minek során a binaurális lokalizáció és jelfelismerés létrejön.

Újabban ezen blokkokat csak *két* részre csoportosítjuk: az első az A és B blokk együttese, a második a C-F blokkhalmazt tartalmazza. Kiegészítve a harmadik, *feldolgozási algoritmikusokat* tartalmazó blokkal kapjuk a háromblokkos modellt [3].

Fontos rámutatni, hogy ebből a kvantitatív modellből hiányzik a monaurális jelfeldolgozás, ami a binaurális mellett mindig jelen van. Emellett párhuzamosan más modell is működhet (a monaurális), így ez nem a teljes hallást modellezi [3].

A binaurális technológia állítása szerint, akkor van az eredeti hangjelenséghez tökéletesen hű hangvisszaadás, ha a két dobhártya jele (füljelek) azonos avval, ami a felvétel helyén lett volna. Az ilyen felvételekhez alkalmas a (jó minőségű) műfej, de a mai technológiai fejlettség mellett felmerült ezek *digitális* megvalósítása is. Ez a gondolat azon alapul, hogy a műfejet lineáris szűrő realizációnak tekinti, és mint ilyen, elméletileg digitális számítással is helyettesíthető, sőt könnyebb és szélesebb tartományú változtatást is lehetővé tesz [3].

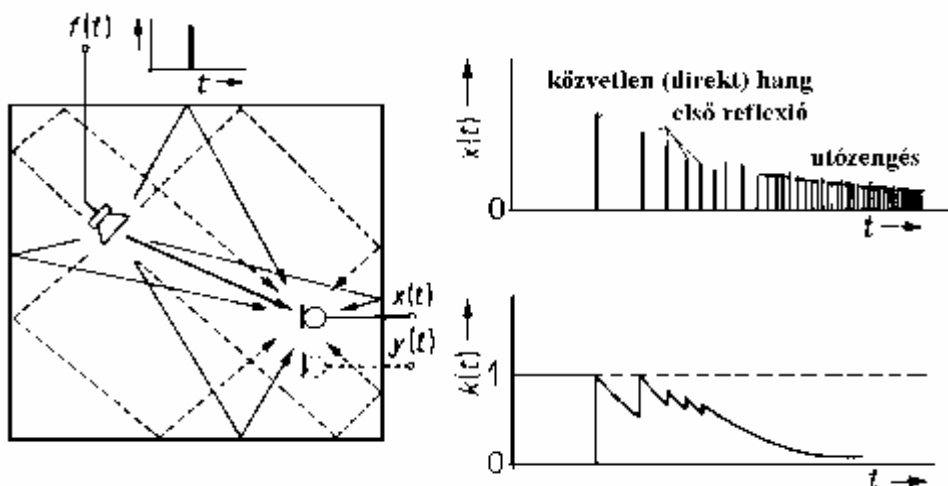


1.14.ábra. A binaurális hallásmodell blokkjai [2].

3.4. Kettőnél több forrás és diffúz hangterek

Kezdetben az egy forrás esetét vizsgáltuk, majd kiterjesztettük két forrásra is. További megfontolásokra van szükség kettőnél több forrás, és diffúz hangterek esetén, melyet elméletileg végtelen sok hangszóróval lehet létrehozni. Összegző lokalizáció akkor lép fel sok forrás esetén, ha mindegyik 3 ms.-nál kisebb időeltéréssel sugároz. Több forrásként értelmezhetjük azt az esetet, mikor egy primer hullám mellett több visszavert is jelen van, erre igaz az EHT. A valószínűsége, hogy egy bizonyos visszaverődés hallható lesz *csökken*, ha több visszavert hullám is van, és ne felejtsük el, hogy primerhullám elnyomás is felléphet. Azt is láttuk, hogy k csökkenése az érzet lokalizálhatóságának romlásához vezet, a hang „terjeszkedik”, és $k=0.2$ esetén már a teljes felső félteret kitölti, tekinthetjük diffúzsnak. Leszögezhetjük, hogy az *összes két hangszórós jelenség fellép*, csak általánosítani kell azokat több forrásra.

Az ún. echogrammot és az utózungést az alábbi vizsgálattal mérték. Egy mikrofont zengőszobába helyeztek, és a teremre impulzus gerjesztést adtak. Az ekkor fellépő impulzusválaszt nevezzük *echogrammnak*. A mikrofon először a *közvetlenül* beeső hangot érzékeli nagy amplitúdóval, majd egy idő után kisebb *elsőreflexiós* hangokat, végül a még kisebb *többreflexiós*, egymással már *átlapolódozó* jeleket (1.15.ábra). Ezen utóbbi sok kis, exponenciálisan lecsengő és már átlapolódozó zajszerű jelrészletet nevezzük utózungésnek. Ekkorra a *primer érzet is teljesen szétfolyik*, és csak diffúz érzet alakul ki. Definiált az ilyen zárt, reflexiós termekre a *Hallrádiusz*, ami az a forrástávolság, ahol a direkt hullám energiája egyenlő az összes visszavert hullám energiájának összegével.



1.15.ábra. Nem süketszobai (reflexiós) terem hangjelenségei, impulzusgerjesztés esetén. Látható a visszaverődések útja és az echogramm. A közvetlen hang, az első reflexiós, és az utózungés jól elkülöníthető [8].

A primerszint emelkedésével a lokalizálhatóság javul, viszont ha túl kicsi *elveszik*, és a tér diffúz lesz. A primerszint és a reflektált *szintek különbsége utal a forrás távolságára*, ezáltal különböző *zengőtér* alakul ki. Minden teremnek más az akusztikája, és ezt lehet a lejátszásnál elektronikusan állítva szabályozni. A kérdés, hogy lehet speciális teremhatást elérni térbeli és/vagy időbeli korláttal, hogy az az eredetihez hű legyen?

A cél a Hifi technikában, hogy olyan *lejátszási teret* kell létesíteni, mint ami a felvételnél volt (szintetikus hangtér), vagy olyan *optimális akusztikai átvitelt*, ahol a füljel olyan a lejátszáskor, mint amilyen a felvételkor lett volna. (pl. műfejen kell a füljelet felvenni, átvinni, és leadni). Minél valóságosabb visszaadást szeretnénk, annál több csatorna kell. A sztereó minimum, de igényes esetben a kvadrofon sem elég, hanem minimálisan hat csatorna jelére van szükség.

Egy speciális mérési eljárást az ún. *TRADIS eljárás*. Ekkor a két hangszóró szelektíven sugározza a fület, és a balból a jobb fülbe jutó nem hasznos jelet a jobb hangszóró kompenzálja ki úgy, hogy egy ellenjelet sugároz. Elméletileg a bal hangszóró csak a bal, a jobb csak a jobbot kellene gerjessze, de nyilván van áthallás, és ez káros jelenség. Ritkán használt mérési módszer.

4. Alkalmazási példák

4.1. Műfejes sztereofónia

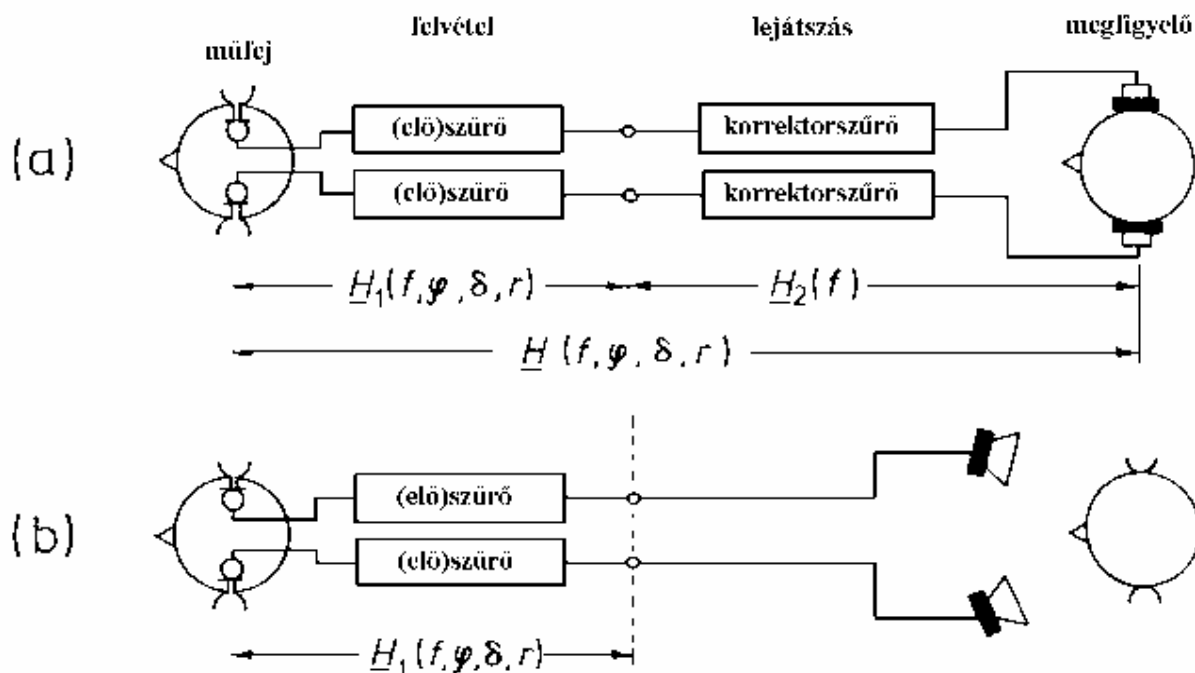
Speciális felvételi eljárások céljára fejlesztették ki, hogy minél hűbb átvitelt tudjunk létesíteni.

A hangjelenség az eredetihez hű, ha a felvétel során a két hallójáratban felvett hangnyomást ua. a személynek fejhallgatón át visszajátszva, a kialakuló füljelek térbeli jellemzői megegyeznek azzal, amit a felvételkor ott érzett volna.

Ehhez a műfej kiválóan alkalmas eszköz, de egy „profi fejen” felvett jel sem alkalmas egy az egyben hangszórós visszajátszásra (természetellenesen cseng), csak fejhallgatósra.

A régi szemlélet szerint, úgy kell a műfejes felvételt elkészíteni, hogy az a hangszórós visszaadás során is hű legyen az eredetihez. Ez így nem lehetséges, hiszen a műfej hallójáratában a felvett jel olyan, amit az emberi dobhártya később gerjesztésként kell kapjon, ha pedig hangszórón sugározzuk ki, a szabad tér, a fülkagyló ...stb. hatása *újra* fellép.

Ezért kompromisszumot kellett kötni, és az elvárásokat, követelményeket csökkenteni annak érdekében, hogy a műfej füljelét mindkét visszajátszási módban el lehessen fogadni. Az új elvárás, hogy a hang a hangszórókból legalább úgy szóljon, mint a szokásos sztereó elrendezés esetén szólna - tehát nem várjuk el a tökéletes hűséget -, viszont továbbra is lehetőség van fejhallgatón át a tökéletes hűség elérésére. Ezt úgy oldották meg, hogy a fejhallgatós lejátszáskor egy korrektorszűrő is be van iktatva (1.16.ábra).



1.16.ábra. A kétféle visszajátszó rendszer blokkvázlata. Helyes fejhallgatós visszajátszáshoz korrektorszűrő szükséges [8].

Mivel a hangszórósnak úgy kell szólnia, mint a sima sztereó elrendezésnek, ezért a műfejes felvételt úgy kell torzítani, mint ahogy azt egy stúdiómikrofon tenné az egyszerű sztereóval. A végső eredmény az lett, hogy a hangszórós visszaadáskor az érzet a szokásos módon a két hangszóró között lép fel, *nagyjából eredeti hű hangszínnel*, és a térbeliség megfelel a szokásosnak (lokalizációs szempontból). Ha fejhallgatón adjuk vissza, akkor *megfelelő kiegyenlítés kell a teljes hűséghez*. Ehhez egy ún. diffúztér-torzítás-kiegyenlített mikrofon kell a műfejbe, ami a stúdiómikrofon torzítást végzi el. Több mikrofont is be lehet vetni, de ekkor keverés kell. Sajnos a nagy költségek, és a körülményes felvétel miatt a lemezstúdiókban nem terjedt el ez a fajta felvételi módszer.

A sztereó elrendezés különleges tulajdonsága, hogy ha csak az egyik hangszóró szól (nincs átlapolódás a jelek között) a hangszín nem változik meg azáltal sem, ha feléfordulunk. Ugyanakkor jelentős hangszín változás lép fel, ha az egyik fülünket befogjuk, függetlenül attól hány hangszóró szólt. Ebből arra következtethetünk, hogy a *füljel elvesztése sokkal fontosabb és erőteljesebb* változást okoz a hallásban, mint ugyanennyi hangjellemző elvesztése a hangforrás helyén. A hallás a hangszínképzésben bizonyos torzításokat képes elnyomni.

Egy különleges lejátszási mód az ún. álsztereó vagy más néven *pseudo-sztereó*. Mint láttuk, az egycsatornás jel egy hangszóró esetén gyakorlatilag semmilyen térhatást nem kelt. Ha egy jel van, de két részben koherens jellé alakítva két hangszóróval játsszuk le, javulhat a hatás. Azért nevezzük ezt álsztereónak, mert noha két forrásból érkezik a jel, azok nem hordoznak többletinformációt, mint az eredeti egycsatornás felvétel, mégis javul a térhatás. Ezt létrehozhatjuk pl. egy alul- és egy felüláteresztő szűrő után, de más módon is. Igazi sztereó (kétszatornás) felvétel esetén a lejátszásnál előáll egy *rész- vagy teljes inkoherencia* a jelek között már a felvételnél

is. Lehetőség van ezáltal a lejátszási teremben *a felvételi térhatást reprodukálni*, de pszeudóban nem, mert ekkor a lejátszáskor létrejött tér független a felvételtől.

4.2. Az additív térbeliség

A reprodukált hangtérre fontos felismerés az, hogy egy zárt térben felvett jel esetén *spontán elképzelés alakul ki a hallgatóban a terem jellegéről, méretéről*, azaz egy térbeli benyomás jön létre. Ennek oka a *visszaverődés és az utószög*.

„Térbeliségnek” nevezzük az érzet egy karakterisztikus térbeli kiterjedését úgy, hogy ezek egy nagyobb teret töltenek ki, mint ami a vizuális forráskörvonalakból adódna. Képesek vagyunk a zenét szinte teljesen elképzelni, és különböző koncerttermek (stadion, terem...) hatását is érzékelni, pedig a jel csak hangszórókból érkezik.

A hallásnak szüksége van reflexiókra és utószögre is ahhoz, hogy a zenei élmény a legjobb legyen. A visszavert jelek részben koherensek az eredetivel, ezért a hallásélmény kialakulásában szerves részt alkotnak. Természetellenesnek találjuk a szabadtéri (vagy süketszobai) terjedést teremakusztikailag és zeneileg egyaránt. Általánosságban elmondható, hogy a térbeliség érzetére szükség van a visszajátszáskor is, és bizonyos jellemzők változtatásával (reflexiók, és az utószögi idő) ez az érzet változtatható. Általánosságban is jobbnak mondjuk azt a termet, ami térbelibb hatást gyakorol ránk. Manapság a 3D hanghatások, és a valóságban fel nem lépő surround elrendezések jönnek divatba elsősorban a mozikban, miáltal a megfigyelő az „események középpontjába kerül”.

A NASA fejlesztette ki azt a binaurális elven működő eljárást, mely HRTF használatával hoz létre térbeli hatásokat. A *Convolver* két konvolúciós egységgel rendelkezik: mindkét fül számára előállítja ugyanazon bemenő jel és az adott fülhöz tartozó (véges) HRIR függvény konvolúcióját. Ez utóbbit egy táblázatból nyeri, a két fül jelét hangszórón át szolgáltatjuk. Ha a HRIR függvények megfelelőek, szinte teljes térbeli információtartalmat kapnak a jelek (tökéletes lokalizáció). A tárolt HRIR számát redukálva a minőség romlik, viszont személyre szabott (mért) függvények használatával erőteljesen javul. Visszhang és terem-szimulációval a modell kiegészíthető [22].

A számítógépek gyors fejlődése lehetővé tette a valószerű számításokat. Létezik olyan kísérleti fejhallgató és kesztyű, mely a virtuális valóságba vezet minket. A fej forgatásával a fejhallgatóból érkező jel (a hallásérzet) nem fordul együtt a fejjel, hanem egy gyors számítógép kiszámítja a fej helyzetéből, hogy a miként kell a jelet módosítani ahhoz, hogy a zenekar „helyben maradjon”. A kesztyűvel pedig a zenekar tagjait (a különböző hangforrásokat) ragadhatjuk ki, és helyezhetjük őket a térben máshová.

Wersényi György (1998.05.13.)

Irodalom

- [1] BLAUERT J., *Raumliches Hören*. S. Hirzel Verlag Stuttgart, Stuttgart 1974.
- [2] BLAUERT J., *Raumliches Hören Nachschrift*. S. Hirzel Verlag Stuttgart, Stuttgart 1985.
- [3] BLAUERT J., *Binaural Technology: A technology with a view*. Proceedings of Inter-Noise 97, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1997. / Vol. II. **1121-1128**. /
- [4] MAIJALA P., *Better binaural recordings using the real human head*. Proceedings of Inter-Noise 97, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1997. / Vol. II. **1135-1138**. /
- [5] MOLLER H., *On the quality of artificial head recording systems*. Proceedings of Inter-Noise 97, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1997. / Vol. II. **1139-1142**. /
- [6] ILLÉNYI A., *Decoding the source information by dichotic hearing*. Proceedings of Inter-Noise 97, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1997. / Vol. II. **1147-1151**. /
- [7] BERÉNYI P., ILLÉNYI A., *What does it mean for an HRTF not to have the minimal phase property ?* Proceedings of Inter-Noise 96, Liverpool, 1996. / Vol. VI. **2127-2130**. /
- [8] BLAUERT J., *Spatial Hearing: the physics of human sound localisation*. MIT Press, Cambridge MA, 1996.
- [9] AT&T ARIEL _ DSP32C Coprocessor Board Operating Manual.
- [10] AT&T WE DSP32C Information Manual.
- [11] BRÜEL & KJAER Head and Torso Simulator Type 4128 Users Manual.
- [12] MOLLER H., *Fundamentals of binaural technology*. Applied Acoustics 36, 1992. / **171-218** /.
- [13] TECH HELP ! TM, *The electronic manual* text version 3.2a / General index/ Parallel Printer Adapter Ports, Flambeaux Software, 1987.
- [14] *Stepping motor*, <http://dvt07.fagmed.uit.no/faq/step/index.html>
- [15] [www.ttt.bme.hu/number 7/spatial hearing research home page](http://www.ttt.bme.hu/number%207/spatial%20hearing%20research%20home%20page)
- [16] WERSÉNYI GY., *A külső fül átviteli függvényének (HRTF) műfejes méréssel történő vizsgálata és mérés technikai problémái*. TDK Konferencia dolgozat, BME-TTT, 1997 november.
- [17] MOLLER H., SORENSEN M.F., HAMMERSHOL D., JENSEN C.B., *Head-Related Transfer Functions of human subjects*. J. Audio Eng. Soc. Vol. 43., 1995. /**300-321**/.
- [18] CROSS D., *DFT and Invers DFT routines and source codes*, <http://www.intersrv.com/~dcross/fft.html>, <dcross@intersrv.com>
- [19] STEINMETZ J., LEE G., *Auditory System*, <http://www.hitl.washington.edu/scivw/EVE/III.A.2.Auditory.html>
- [20] *Measured vs Modeled HRTF's*, http://www-engr.sjsu.edu/~knapp/HCIROD3D/3D_sys2/m_vs_m.html
- [21] *Headphones vs Loudspeakers*, http://www-engr.sjsu.edu/~knapp/HCIROD3D/3D_sys2/h_vs_l.html
- [22] *The Concolvotron*,

http://www-engr.sjsu.edu/~knapp/HCIROD3D/3D_sys2/convtron.html
[23] *HRTF models*,
http://www-engr.sjsu.edu/~knapp/HCIROD3D/3D_sys2/models.html
[24] *HRTF: Horizotal Plane*,
http://www-engr.sjsu.edu/~knapp/HCIROD3D/3D_HRTF/HRTF_hor.html
[25] *HRTF: Median Plane*,
http://www-engr.sjsu.edu/~knapp/HCIROD3D/3D_HRTF/HRTF_med.html
[26] *Head-Related Transfer Functions*,
http://www-engr.sjsu.edu/~knapp/HCIROD3D/3D_HRTF/3D_HRTF.html
[27] PRALONG és CARLILE, "*Measuring the human head-related transfer functions: construction and calibration of miniature in-ear recording system (1994)*",
Auditory Neuroscience Laboratory's HRTF measurments service,
http://www.psychiol.su.oz.au/simonc/hrtf_rec.htm
[28] *Measurment of HRTF*,
<http://www.physik.uni-oldenburg.de/Docs/aku/yang/node2.htm>
[29] *Immersive Audio Systems*,
<http://sipi.usc.edu/~ckyriak/immersive.html>
[30] BERÉNYI P., CSIPES Z., ILLÉNYI A., *Az egyfülű HRTF függvények irányisajátságai Brüel Kjaer műfejen történt mérések alapján*. Előadásfólia-sorozat, BME „Békésy György” Akusztikai Kutatólaboratórium, Budapest 1992-1996.

Az anyag a BME-TTT számára készült oktatási célú, összefoglaló jellegű ismeretanyag. Mindenki saját felelősségére, saját használatra töltheti le szabadon.