

Teremakusztikai és binaurális szimuláció akusztikai programokkal

Nyikos András, n_andras24@freemail.hu

Feladat:

- Ismertesse röviden a teremakusztikai szimulációk megvalósítását, az impulzus válasz szerepét, a konvolúció módját, eljárását (az időtartományban). Mutassa meg a kapcsolatot az időtartományi konvolúció és a frekvenciatartománybeli szorzás között. Külön térjen ki a teremakusztikában használatos függvényekre (RIR: Room Impulse Response) valamint a műfejes technológiára (HRIR: Head-Related Impulse Response), beleértve a fejhallgató kiegyenlítés szerepét is.
- Töltsön le az internetről ilyen függvényeket a vizsgálatok céljára. Ismertesse a wave fájlok felépítését (fejléc, PCM adatok stb.).
- Mutassa be röviden az alábbi programok használhatóságát, formátumait, céljait, lehetőségeit:
 - o AUDITION környezetet, kiemelve annak konvolúció műveletét. Adjon rövid leírást a kezelésről.
 - o Altiverb család
 - o Egyéb programok
- A letöltött HRIR, RIR ill. mért RIR függvények segítségével hozzon létre teremszimulációval ellátott mintafájlokat. Bemeneti jelhez mono wave fájlokat használjon (felvétel vagy szintézis, netán mono zenei felvételek stb.)

Utolsó módosítás: 2007-10-29

Dr. Wersényi György, C609
wersenyi@sze.hu

Államvizsgatárgyak:

Digitális jelfeldolgozás (ta09vi)
TV technika (ta55vi)
Stúdiótechnika (ta82vi)

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	4
2. Hang	5
2.1. Hangtani alapfogalmak.....	5
2.1.1. Hanghullám.....	5
2.1.2 Hangnyomás és intenzitás.....	5
2.1.3. Hangforrás	6
2.1.4. Irányhallás.....	6
2.2. A hangtér a fülök közelében	7
2.3. Helymeghatározhatóság	7
2.3.1. Lokalizáció.....	7
2.3.2. Lokalizációs bizonytalanság.....	7
2.4. A hangtér a fülök közelében	10
3. Hallás a vízszintes síkban.....	10
3.1. Különbségi idő.....	10
3.2. Szint különbség	11
3.3. Monaurális és interaurális jellemzők.....	11
3.3.1 Monaurális jellemzők	11
3.3.2 Interaurális jellemzők	11
3.4 Átviteli függvények	11
4. A teremakusztika	13
4.1. Teremakusztika alapjai.....	13
4.2. Az utózungési idő	14
4.2.1. Az utózungési idő számítása.....	14
4.2.2. Az utózungési idő mérése	15
5. A konvolúció és alkalmazása	16
5.1. A konvolúció elmélete.....	16
5.1.1. Impulzusválasz.....	16
5.1.2. A műveletek matematikai háttere	18
5.1.2.1. Időtartomány.....	18
5.1.2.2. Frekvenciatartomány	19
5.1.2.3. Komplex frekvenciatartomány	19
5.1.2.4. Laplace-transzformáció	20
5.1.2.5. Konvolúciós integrál	21
5.1.3. A konvolúció ismertetése.....	21
5.1.3.1. A konvolúció matematikai definíciója	21
5.1.3.2. A konvolúció törvénye	22
5.1.3.3. Szűrés és a konvolúció kapcsolata	22
5.1.3.4. Gyors konvolúció	24
5.2. A konvolúció gyakorlati alkalmazása.....	25
5.2.1. Hangátviteli függvények.....	25
5.2.1.1. HRTF függvények.....	25
5.2.1.2. HRIR függvények.....	25
5.2.1.3. RIR függvények.....	26
5.2.2. Konvolúció terem impulzusválasz függvényekkel (RIR).....	27
5.2.3. Az impulzusválasz (RIR) mérésének szabályai.....	27
5.2.4. Konvolúciós zengető.....	28
5.2.5. Fejhallgató kiegyenlítés	28
5.2.6. Wave állományok	29

5.2.6.1. Wave állományok ismertetése	29
5.2.6.2. Wave állományok felépítése	30
6. Szimuláció Adobe Audition programmal	30
6.1. Adobe Audition 1.5 program ismertetése	30
6.1.1. Az Adobe Audition 1.5 szolgáltatásai	31
6.1.2. Az Adobe Audition 1.5 funkciói	31
6.1.3. Az Adobe Audition kezelőfelülete	32
6.2. Teremimpulzus-válasszal végrehajtott konvolúció	37
6.3. Kisebb terek szimulációja	48
6.4. Az Adobe Audition beépített konvolúciós alkalmazásai	50
6.4.1. Full Reverb	50
6.4.2. QuickVerb	52
6.4.3. Reverb	53
6.4.4. Studio Reverb	54
6.5. Mért impulzusválasz alkalmazása	54
6.5. Az Aurora segédprogram-csomag	55
6.6. Rövid utószó az Auditionhoz	60
7. Más, konvolúción alapuló programok	60
7.1. AudioEase Altiverb 5.	60
7.2. CATT GratisVolver program	66
7.3. Waves segédprogramok	67
7.4. Egyéb konvolúciós programok	69
8. Összefoglalás	70
9. Felhasznált irodalom	71

1. Bevezetés

A dolgozat a virtuális technikák egy új változatát mutatja be, amely alkalmas arra, hogy a hallgatói környezetben - akár valós időben is - előállítsunk egy olyan hangteret, amelyben a hallgató úgy érzi, mintha egy másik teremben tartózkodna. A technológia valódi termék mérési eredményein alapul, lehetővé teszi a hangmérnök számára a kreatív beavatkozást és támogat minden jelenlegi sokcsatornás hallgatói elrendezést. Alkalmazási lehetőségei az elérhető árú nagy számítási kapacitású processzorok megjelenésével és elterjedésével szélesednek ki igazán, mert így a technológiát használó eszközök a hangstúdióból és az ipari felhasználóktól az otthoni felhasználókig is eljuthatnak.

A hangtér reprodukciójának célja már az 1950-es években felmerült. Azóta számos rendszer terjedt el, amely - egyebek mellett az emberi hallás sajátosságait kihasználva - képes a hallgató számára elfogadható, természetű hangzást produkálni. Ezen rendszereket tekintettem most át, beleértve ez ide szükséges elméleti alapokat is.

Szó lesz azon módszerekről, amelyek valós idejű konvolúciót használva utólag hoznak létre valódi helyszíneken mért akusztikai környezetet a hallgató számára, így lehetővé téve például azt, hogy egy hangszert utólag, virtuálisan a térbe helyezzünk. Ennek a technikának számos gyakorlati alkalmazási lehetősége van a hangmérnökök számára kifejlesztett zengetőn keresztül a házimozi-rendszeren át az autópárig, az alkalmazások pedig csak mostanában kezdenek terjedni a rendszerek jelentős számítási igényei miatt.

A térmodellezés elterjedt módszer arra, hogy visszhangmentes, általában stúdióban felvett hangokat virtuálisan egy tetszőleges akusztikus térbe helyezzünk, ezzel javítva a beszédhang és a zene élvezhetőségét. Másrészt, a modellezést arra is használják (például az autópárig), hogy az adott akusztikus tér bizonyos paramétereit ellensúlyozzák. Ehhez a hangokat a környezetnek megfelelő előfeldolgozásnak vetik alá, hogy végeredményben az eredeti felvétel hangzásához hű élményben legyen része a hallgatónak.

A térmodellezéssel kapcsolatban tárgyalásra kerül a megvalósításhoz szükséges impulzusválaszok mérésének és mesterséges előállításának kérdésköre. A mérések és egyéb műveletek elvégzésére az Adobe Audition 1.5 professzionális hangszerkesztő programot használtam. Ezt a programot más, speciálisan mesterséges hangtér-előállításra kifejlesztett alkalmazásokkal is összehasonlítottam.

2. Hang

2.1. Hangtani alapfogalmak

2.1.1. Hanghullám

Hanghullámnak nevezünk minden olyan rezgő mozgást, amely 20 Hz-20 kHz közötti tartományban helyezkedik el.

A rezgés általános alakja:

$$y(t) = A_0 + A \sin(\omega t + \varphi)$$

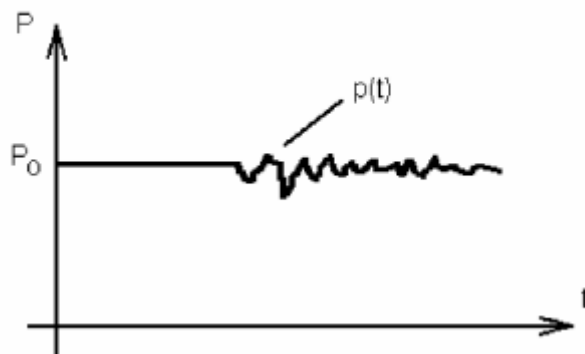
ahol $y(t)$ a pillanatérték az idő függvényében, A az amplitúdó, ω a körfrekvencia [rad/sec]-ban, az A_0 amplitúdó egyen szintje (ez általában 10^5 Pa).

2.1.2 Hangnyomás és intenzitás

A hang egyik nagyon fontos paramétere a hangnyomás.

Hangnyomásnak nevezzük másképpen a már előbb is említett amplitúdót.

$$P(t) = P_0 + p(t)$$



A hangnyomás időfüggvénye

A másik nagyon fontos paraméter az intenzitás. Az intenzitás 1 m^2 felületen, 1 s alatt átviramlott (átlag) energia. A hangnyomással és a részecskesebességgel megadva:

$$i = p v \text{ [W/m}^2\text{]}.$$

Az intenzitás vektoriális mennyiség, az iránya a részecskesebességből adódik.

A hangnyomásnak és az intenzitásnak is létezik dB-ben megadott szintje. Nagyon kell ügyelni arra, hogy ezeket ne keverjük össze se egymással, se a skalár mennyiségekkel.

Az intenzitásszint:

$$I = 10 \log (I / I_0) [\text{dB}]$$

, ahol $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Látható, hogy az intenzitás teljesítmény jellegű mennyiség, azaz a logaritmus előtti szorzó tíz. Az összes többi decibel, amit használunk, feszültségdecibel, azaz húszas a szorzó.

A hangnyomásszint:

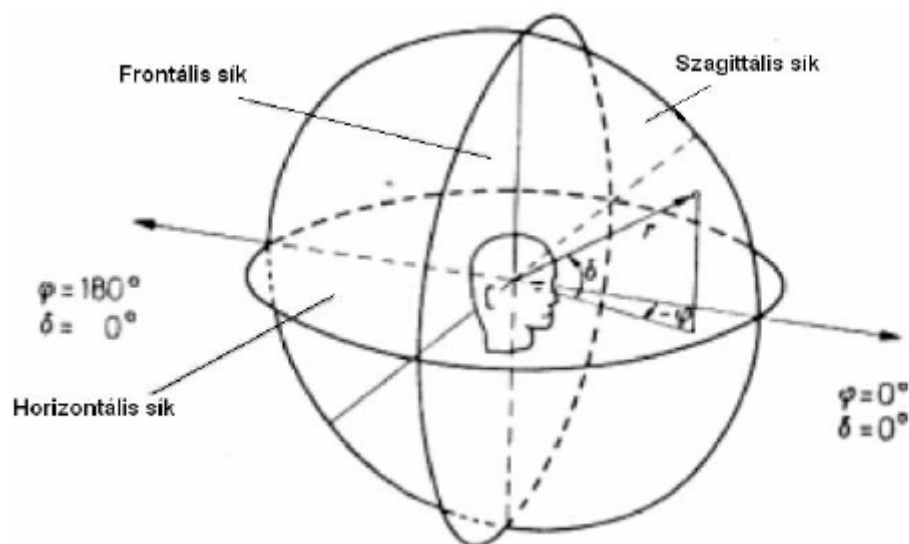
$$P = 20 \log (P/p_0) [\text{dB}]$$

, ahol $p_0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$.

2.1.3. Hangforrás

Hangforrásnak nevezzük azt a forrást, ami a hangot kiadja. A kiadott hangnak itt is a 20 Hz-20 kHz közötti tartományba kell esnie. A hangforrást három alapvető tulajdonságával adhatjuk meg :

- helye
- iránya
- szöge



Fejhez rögzített koordináta-rendszer

Arra viszont figyelni kell, hogy a hallásérzet helye nem minden esetben egyezik meg a hangforrás helyével.

2.1.4. Irányhallás

Az irányhallás az emberi fejlődés során kialakult képesség. Jellemzője, hogy tapasztalati úton javul az ember irányhallási képessége. Az irányhallás miatt tudjuk megkülönböztetni az egymástól különböző hangforrásokat.

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. 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. 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. 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.

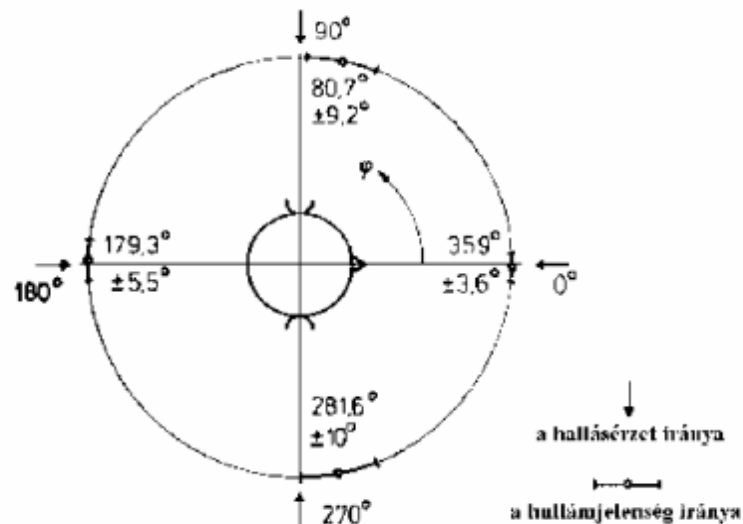
2.3. Helymeghatározhatóság

2.3.1. Lokalizáció

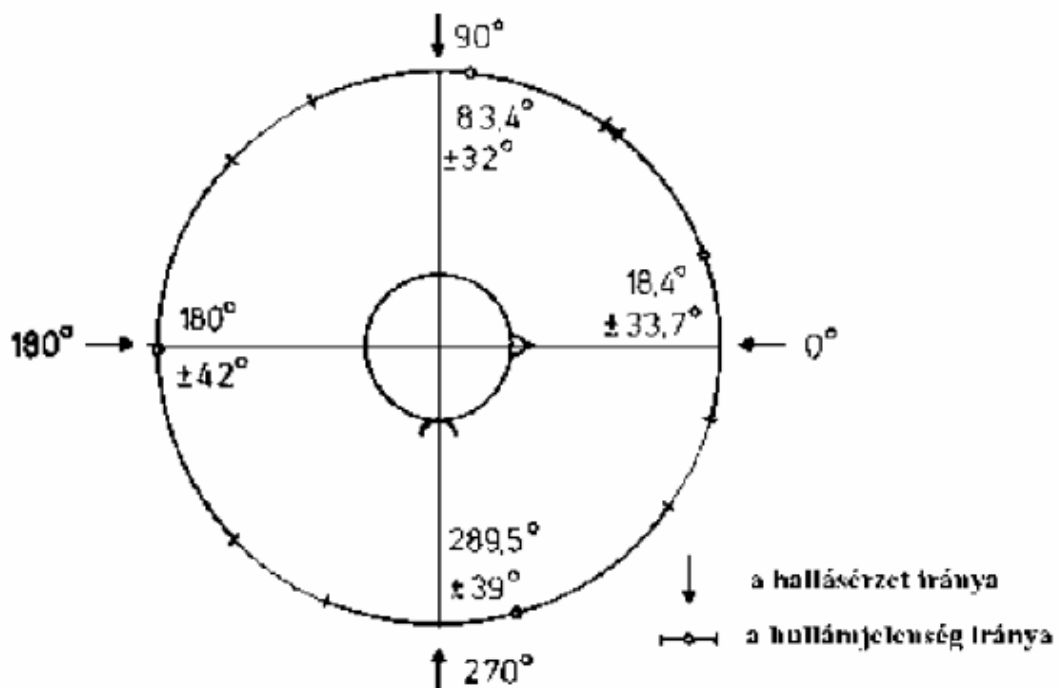
A lokalizáció során a hallás a hallásérzet helye és a hullámjelenség meghatározott ismertetőjelei között létesít kapcsolatot. Ezen jellemző(k) kis megváltozása helyváltoztatás-érzetet kelthet. A lokalizációs bizonytalanság az a minimális helyváltoztatás, amit a hallórendszer már érzékelni tud, azáltal,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

2.3.2. Lokalizációs bizonytalanság

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” $\pm 5^\circ$. 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.



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.

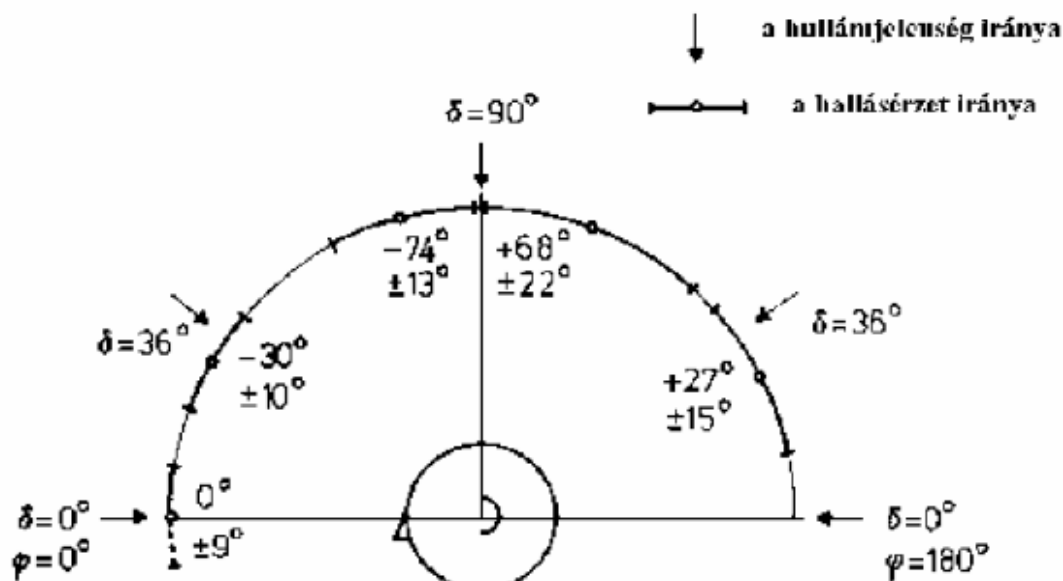


U

gyanaz a feladat 32 alannyal. A különbség, hogy a bal fül teljesen süket

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 $\pm 9^\circ$, 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.



A lokalizációs bizonytalanság ($\Delta\delta_{\min}$), és a lokalizáció a mediális síkban, ismert beszélő esetén. 7 alany, 65 phon, a fej fixált

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. Relative keskenysávú jelek esetén előállhat az a jelenség, hogy az érzet nem a hang beesési iránya felől, hanem a fül tengelyére tükör szimmetrikusan (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 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 járattván 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 jobbrabalra pattogna. Túl gyors változás esetén pedig diffúz hangtér alakul ki a fejben, és úgy tűnik, minden hangszóró egyszerre szól.

2.4. 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. 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 készültek esetén. 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. 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.

3. Hallás a vízszintes síkban

3.1. Különbségi idő

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 1,6 KHz 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 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.

3.2. Szint különbség

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 perceket vesz igénybe.

3.3 Monaurális és interaurális jellemzők

Ez a két jellemző soha nem fordul elő egymás nélkül. Ha változik az interaurális akkor a monaurális is változni fog.

3.3.1 Monaurális jellemzők

Ezek a jellemző tulajdonságok az egyfülű hallásra jellemzőek, és az érzet helyének kialakulásában nagy szerepük van. Ilyen jellemzők minden egyes hangjelben találhatók. Ezekből az érzet távolságára, az emelkedés szögére és az előre-hátra irányok meghatározására következtethetünk. Ezt fejhallgatón kétféle képen tudjuk sugározni, vagy úgy hogy az egy jel szól mindkét fejhallgatón (diotikus), vagy úgy hogy csak az egyik fejhallgató szól a kettőből (monotikus). Ez a mediális síkban lép fel általában.

3.3.2 Interaurális jellemzők

Csak a kétfüles hallásra hasznosíthatók. Ezek a jellemzők a két füljel közötti eltérést és azok viselkedését határozzák meg. A vizsgálata fejhallgatón keresztül történik úgy, hogy mindkét fejhallgatón szól és a jelek is különbözőek. Ez már nagyon hasonlít a sztereó hanghoz, mert a bal fül a bal oldali jelet kapja, a jobb pedig a jobb oldali jelet kapja.

3.4 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 $\varphi=\delta=00$. 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:

$$A_3(f)_{\Phi=30} = \frac{A_2(f)_{\Phi=330}}{A_2(f)_{\Phi=30}}$$

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:

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

Ezek után lehet felvenni a „hallhatósági függvényt”, azaz a hallásküszöb frekvenciafüggését illetve az azonos hangosságú pontok frekvenciamenetét (Fletcher-Munson).

A monaurális átviteli függvény adódik a küszöbgörbék különbségeként, illetve 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.

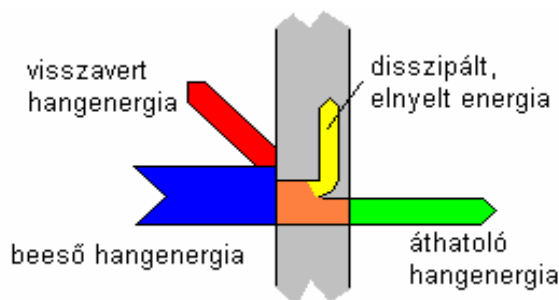
Lehet jelfüggő mérést is végezni: impulzusgerjesztés hatására impulzusválaszt vizsgálhatunk. Az átviteli függvény egyenlő a kimeneti jel időfüggvényének Fourier transzformáltjának és a bemeneti jel Fourier-transzformáltjának hányadosával. Az FFT minden esetben nagy segítséget adhat a sok számolás miatt.

4. A teremakusztika

4.1. Teremakusztika alapjai

A teremakusztika külön a termék akusztikájával, hangzásával foglalkozik. A tervezés során a cél egyrészt a jobb hangzás, másrészt a hangszigetelés: zajmentesség ki- és befelé.

Egy akadályba (fal) ütköző hanghullám energiájának (incident energy) egy része visszaverődik (reflected energy), kisebb része áthatol azon (transmitted energy), a legkisebb része pedig hő formájában melegíti azt (absorbed energy).



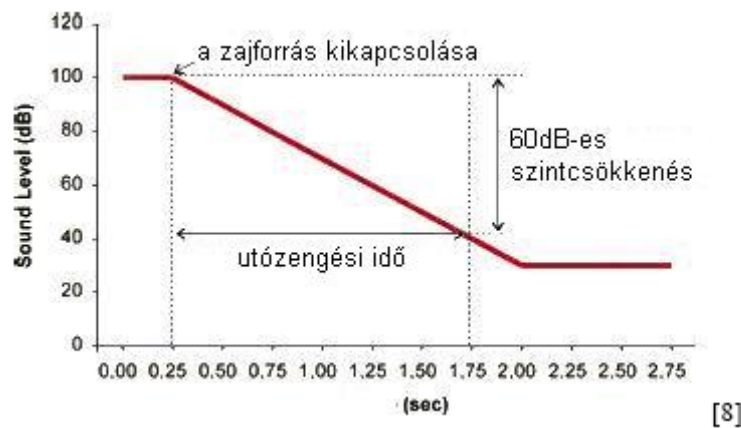
Ha a hullámhossz jóval kisebb a fal felületénél, a beesési- és visszaverődési szögekre, a hangutak kiszámításához alkalmazhatók a fénytörési törvények (pld. beesési szög = visszavert szög).

Az 50ms-nál található a visszhang-küszöb (ez kb. 17 méteres távolságnak felel meg), e felett visszhangot fogunk érzékelni. A visszhang káros jelenség, rontja a beszédérthetőséget és a hangzást is. Ugyanakkor a jó hangzáshoz visszaverődésekre szükség van, a süketszobának zeneileg nem jó az akusztikája (nem is ez a célja). Többutas hangterjedéskor a visszaverődések hozzátartoznak a zenei élményhez. A hangenergia egy pontban a direkt és a visszavert hullámok energiájának az összege. Ez lehet erősítés és kioltás is (interferencia). A terem komplex rezonátor, természetes rezgő módosukkal. A kialakuló hullámtér elsősorban a hullámhossz és a terem geometriájától függ – a módusai ugyanúgy tárgyalhatók, ahogy egy húr rezgései. A terem természetes módusai (rezonanciái) helyi maximumokat és minimumokat hoznak létre, amelyek a geometriai alaktól és mérettől és a hullámhossztól függ. Érdekessége, hogy nyomás duplázódása lép fel a reflektív felületeknél és nyomásmaximum a sarkokban. Gyakorlatilag a konkurensen, időben eltolódva megjelenő módusok azok, amelyek létrehozzák a diffúz teret.

A falban elnyelt hangenergiát általában állandónak tekinthetjük és hő formájában szabadul fel. Mivel tökéletes visszaverődés csak elméletben van, a betáplált hangenergia egy teremben fokozatos elvész, ezért ha ott állandó energiaszintet akarunk tartani, akkor a veszteségeknek megfelelően azt állandóan pótolni kell. Ha ez a betápláló forrás leáll, az energia exponenciálisan esni kezd. Ennek mértéke függ az anyagtól, a frekvenciától és a beesési szögtől is.

4.2. Az utózengési idő

A legfontosabb paramétere egy teremnek az *utózengési idő* (reverberation time), jele a τ . Az az időtartam, ami alatt adott, kezdeti hangnyomásszint szint 60 dB-t esik (1000-ed részére csökken a nyomás).



A reflexiók hatása a mért jelben. Az utózengési időt logaritmikus skáláról olvassuk le.

Az utózengési időről elmondhatjuk, hogy

- τ nagy, ha sok a reflexió (pl. fürdőszobában)
- τ kicsi, ha kevés a reflexió (pl. bútorok, könyvek között)
- τ frekvenciafüggő: kis frekvenciáknál hosszabb (nehezebb elnyelni)
- τ határozza meg a terem felhasználhatóságát
- a nagy τ rontja a beszédérthetőséget és a zene élvezhetősége is csökken
- zenéhez kb. $\tau_{\max} = 1...3$ s szükséges

Néha diagrammal is megadhatjuk értékét.



4.2.1. Az utózengési idő számítása

Az utózengési időt számíthatjuk és mérhetjük is. Létezik két empirikus (megfigyelésen alapuló, tapasztalati, azaz nem egzakt matematikai levezetésből adódó) formula. A τ értéke függ a terem térfogatától (V) és az ún. abszorpciótól (elnyelés). Nem túl kicsi τ esetén alkalmazzuk a *Sabine* formulát, három lépésben:

$$\tau = \frac{0,161V}{A}$$

Ahol az utózungési időt sec-ban kapjuk meg, ha V -t köbméterben, A -t négyzetméterben helyettesítjük, a 0,161-es konstansnak pedig [s/m] a dimenziója.

Az A itt nem a felületet jelenti közvetlenül, hanem az abszorpciót:

$$A = \sum_i \alpha_i S_i = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_i S_i$$

Ebben a képletben az S változó már ténylegesen egy adott felületet jelent négyzetméterben, a hozzátartozó elnyelési tényezővel (alfa). Az elnyelési tényező általában adott, táblázatból kikereshető.

Gyakorlatilag arról van szó, hogy a különböző anyagú felületeket súlyozzuk. Így ha van egy betonszoba adott felülettel és alfával, akkor az azon nyitott faajtó felületét is a fa alfájával kell súlyozni. Alfa mérhető is, és számolható is:

α = elnyelt energia/beeső energia.

Az elnyelési tényező frekvenciafüggő.

Ez a képlet nagy utózungési időknél használatos, és egyenletes terjedést feltételez minden irányban (izotróp), a terem módusait elhanyagoljuk. Nagyobb A esetén az eredmény egyre pontatlanabb lesz, és egyre kisebb τ esetén is.

Kisebb τ esetén a másik használatos képlet az *Eyring*-formula:

$$\tau = \frac{0,161V}{S \ln(1 - \bar{\alpha})}$$

ahol egy átlagos alfával dolgozunk:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_i S_i}{S_1 + S_2 + \dots + S_i}$$

és

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_i$$

Akkor a legpontosabb ez a formula, ha az α -k kb. egyelők (hátrány), ugyanakkor matematikailag korrektebb, mert süketszobára, ahol alfa értéke egy, τ -ra zérus jön ki.

4.2.2. Az utózungési idő mérése

Alapjában két módszer létezik a mérésre. A legjobb az *impulzusválaszos* mérés, amikor impulzussal gerjesztjük a termet (létezik kimondottan erre készült pisztoly-hangforrás, de egyszerű papírzacskó durrantás is megfelel). Majd mérjük azt az időt, amikor a kezdeti „bumm” szintje hatvan dB-t esik. Hátránya a módszernek, hogy kevés energiát közöl kis frekvenciákon, nem reprodukálható és nem biztos, hogy elég sokáig tart az impulzus.

A másik módszer *zajgerjesztéssel* dolgozik. A zajgenerátor fehérzajt ad ki magából (esetleg rózsaszín zajt, ami a fehérzajnak -3dB/oktáv val csökkenő verziója). A rózsaszín zajt akkor használjuk, ha az átvitel olyan szűrőn keresztül történik, melynek sávszélessége a frekvenciával arányosan nő, dupla sávszélességű lesz oktávonként. Ilyen szűrőbe egyre kevesebb energia kell ahhoz, hogy a közölt energia konstans maradjon, méghozzá pontosan -3dB/oktáv . Az ilyen szűrők sávszélessége a logaritmikus tengelyen egyforma csak (lásd ábra). Ezek tipikus oktáv- vagy tercsávszűrők, melyek értelemszerűn változó szélességűek, ahogy egyre nagyobb frekvenciákon állítjuk elő. A hangforrás legyen hangos, mely általában hangszóró vagy ún. referencia zajgenerátor, Miután ezt bekapcsoltuk és feltöltöttük a hangteret energiával beáll egy állandó szint, kikapcsoljuk, és nézzük, mennyi idő alatt esik az a szint 60dB -t.

5. A konvolúció és alkalmazása

5.1. A konvolúció elmélete

Az 1950-es években megjelentek azok az eszközök, amelyek a folytonos idejű (analóg) és diszkrét idejű (digitális) jelek közti konverzióra képesek. Ez nagy teret nyitott a programozott jelfeldolgozásnak. Ma az egyre növekvő processzorsebességek lehetővé teszik a korábban egzotikumként emlegetett, számításgényes technikákat, olcsó PC-ken. A konvolúció ezen technikák közül egy. A konvolválás egy alapvető művelet a jelfeldolgozásban, amely – szemléletesen – két jelet házasít össze. Implicit módon jelen van a következő típusú hangfeldolgozási algoritmusok mai verzióiban is: szűrés (*filtering*), moduláció (*modulation*), térhatás generálás (*spatialization*), zengetés (*reverberation*), gerjesztés (*excitation*). A konvolúció ugyanakkor teljesen tönkre is teheti a bemeneti hang alakját, így a helyes használat érdekében fontos megérteni a működését.

5.1.1. Impulzusválasz

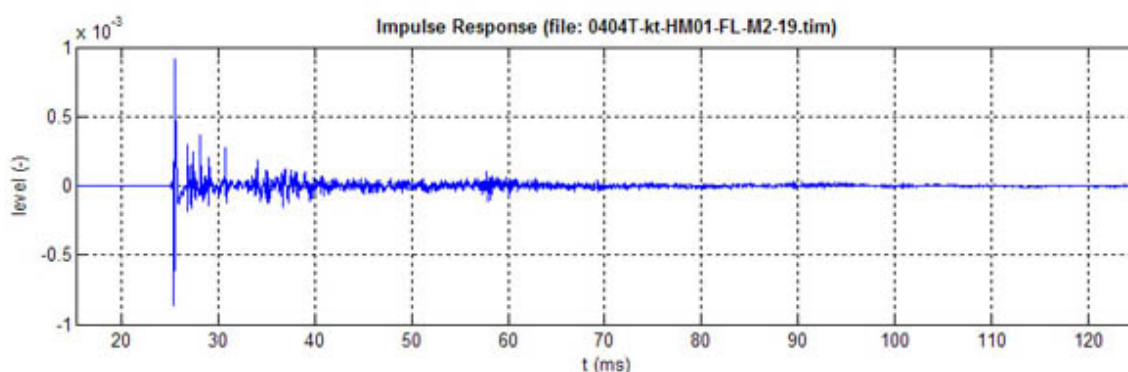
A *szűrő* egy nagyon általános kifejezés. Általánosítva minden rendszer egy szűrő, ha elfogad egy bemeneti jelet, és kimeneti jelet produkál. Tehát a konvolúció is egy szűrő. Egy jó módszer a szűrők tesztelésére, ha megvizsgáljuk, hogyan reagálnak bizonyos tesztjelekre. A jelfeldolgozásban fontos tesztjelek egyike az *egységimpulzus* – egy pillanatnyi energia-kitörés maximális amplitúdóval. Digitális rendszerekben a legrövidebb lehetséges jel egy mintavételezésnyi idejű. Az egységimpulzus jel az adott mintavételezési gyakoriság mellett lehetséges összes frekvencián tartalmaz energiát.



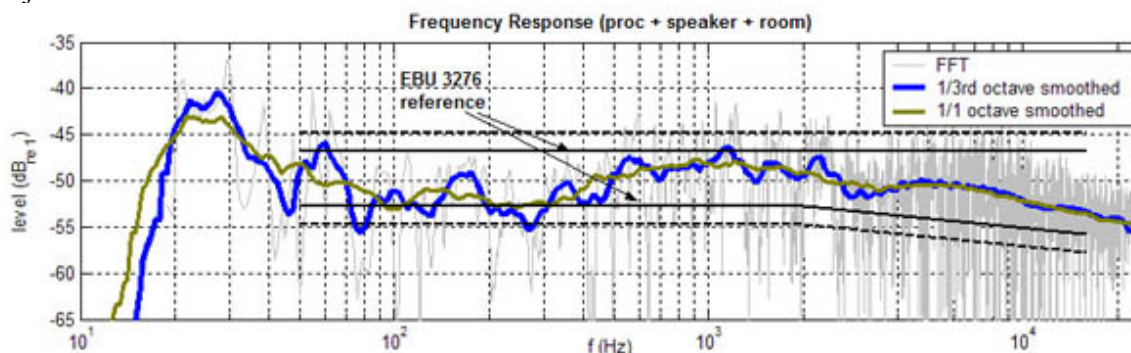
Egy általános szűrő: Dirac-delta bemenettel, és az impulzusra adott, önmagára jellemző válasszal, az impulzusválasszal

Egy egységimpulzus jellel táplált szűrő kimeneti jelét a szűrő *impulzusválaszának* (*impulse response – IR*) hívjuk. Az impulzusválaszt gyakran keverik a *frekvenciaválasszal*. Fontos itt leszögezni, hogy a kettő ugyan hasonló információt tartalmaz, de különböző értelmezési tartományokon. Az IR időtartományon mutatja a rendszer egységimpulzusra adott válaszát, míg a frekvenciaválasz a frekvenciatartományon.

Az impulzusválasz (Impulse Response) azt mutatja, hogy egy igen (ideális esetben végtelenül) keskeny impulzusjelre hogyan válaszol a rendszer. Az impulzusválasz egy lineáris (tehát pl. harmonikus torzítások nélküli) rendszer minden jellemzőjét tartalmazza. A mérésnél az impulzusválasz a processzor, a hangsugárzó és a szoba impulzusválaszát is tartalmazza. Az impulzusválasz időbeli lefolyása mutatja a direkt hang és a legfontosabb visszaverődések időzítését és nagyságát. A szabványosított mérési eljárások mind az impulzusválasz mérésén alapulnak.



A frekvencia-átvitel (Frequency Response) az impulzusválaszból számolható. A frekvencia-átvitel az amplitúdó-átvitelből és a fázisátvitelből áll, de rendszerint csak az amplitúdó-átvitelt szokás vizsgálni. A fázisátvitel elemzésére csak akkor van szükség, ha egy probléma az amplitúdó-átvitelből nem látható (pl. a mélysugárzó és szélessávú hangsugárzók időbeli illesztése a keresztváltási frekvencia körül). A fül felbontása kb. 1/6 - 1/9 oktávsávnak felel meg, a szabványok 1/3 oktávsávós simításra adnak toleranciát. A szűkebb tolerancia az 1/3-ad oktávsávban simított amplitúdó-átvitelre ad követelményt (jellemzően $\pm 3\text{dB}$ ingadozást megengedve) a referencia lehallgató stúdióhelyiségek számára az EBU Tech 3276 ajánlás szerint. Ez igen szigorúnak számít, a legtöbb hangsugárzó süketszobában sem képes ennek teljesítésére.

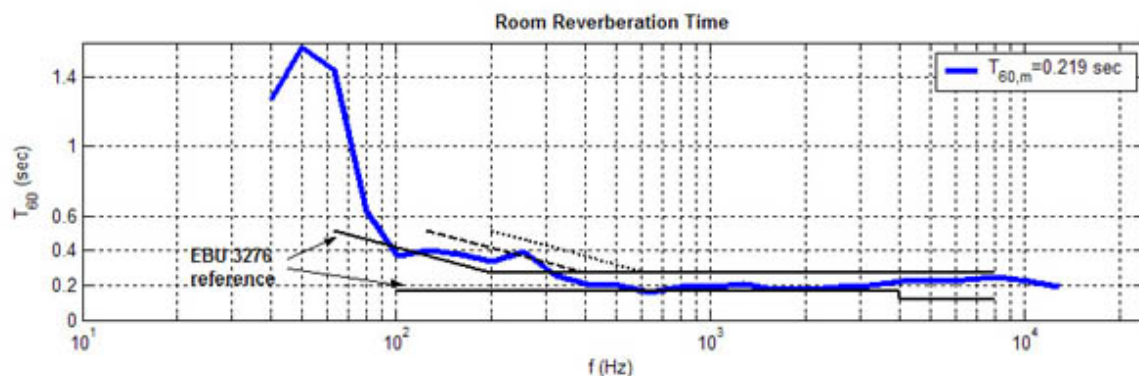


A bemenet, kimenet és az impulzusválasz közti kapcsolat maga a konvolúció. Egy szűrő a saját impulzusválaszát (tehát az egységimpulzus tesztjelre adott válaszát) konvolválja a bemeneti jellel, és így hozza létre a kimeneti jelet. A konvolúciónak számtalan olyan gyakorlati következménye van, amelyeket az audio technikában alkalmaznak. Vegyünk egy

egyszerű audio rendszert! A hanghullámok szemszögéből például egy tágas terem is megfelel. Ha ennek a teremnek az impulzusválasztát megmérjük és konvolváljuk egy tetszőleges hanghullámmal, akkor eredményként a bemeneti hangunk egy olyan variánsát kapjuk, mely „hallhatólag” a teremben szólal meg. Ebben a példában a szűrő maga a terem. Meg szokták továbbá mérni mikrofonok, hangszórók, torzítások, késleltetések, hangszerek, szobák, természetes visszhangok impulzusválasztát, hogy ezek karakterisztikáit egy másik rendszerre illesszék, vagy azzal összhangba hozzák.

A konvolúció által előidézett hatás a zengetés. Angol terminológiában „reverberation”, de hangfeldolgozó programokban gyakran csak „verb”-ként tüntetik fel, ami a magyar szakzsargonban is ismert.

Az utózengési idő (Room Reverberation Time) azt mutatja, hogy mennyi idő alatt cseng le („tűnik el”) a szobába bevitt hangenergia. Minél tovább marad a hangenergia a szobában, annál több problémát okozhat (frekvencia-átvitel, térérzet, hangtisztaság, stb.). Jellemzően templomokban 5 - 8, koncerttermekben 1,5 - 2,2, színházakban 1,0 - 1,5, stúdiókban 0,2 - 0,6, süketszobákban pedig kisebb mint 0,05 másodperc az utózengési vagy lecsengési idő. Akusztikailag kezeletlen lakószobák tipikus utózengési ideje a közepes frekvenciasávban 0,5 - 0,9 másodperc. A szűkebb tolerancia az 1/3-ad oktávsávban számolt lecsengési időkre ad követelményt (jellemzően 0,05 másodperc ingadozást megengedve) a referencia lehallgató stúdióhelyiségek számára az EBU Tech 3276 ajánlás szerint. Ez igen szigorúnak számít, a legtöbb stúdió és vezérlőhelyiség sem teljesíti tökéletesen ezt a követelményt. Az enyhébb toleranciák az otthoni zenehallgatásra, házi-mozira vonatkozó ajánlásaink.



5.1.2. A műveletek matematikai háttere

5.1.2.1. Időtartomány

A természeti törvények - így esetünkben a hangjelek - leírásának, megfogalmazásának legtermészetesebb módja az időtartománybeli jellemzés. Ez úgy történik, hogy megfelelő bemeneti jelek hatását vizsgáljuk a rendszer kimenetén. A bemenetre kapcsolt vizsgáló jelet gerjesztésnek, a kimeneten kapott jelet válaszjelnek nevezzük. Általános esetben lineáris, koncentrált paraméterű, idő invariáns rendszert vizsgálunk. *Lineárisnak* tekintjük a rendszert, ha érvényes rá a szuperpozíció tétele. Az állandó együttható garantálja az *időinvarianciát*. Ez azt jelenti, hogy a rendszer viselkedése független a vizsgálat időpontjától. Ha még azt a megkötést is rögzítjük, hogy a rendszer vizsgálata a $t < t_0$ időre nem terjed ki, azaz a gerjesztés belépő függvény jellegű, ugyanekkor a válasz is belépő jellegű, a rendszert *kauzálisnak* is mondjuk. Itt a gerjesztőjel jövőbeli értékei nem befolyásolják a válaszjel pillanatnyi értékét.

5.1.2.2. Frekvenciatartomány

Vizsgálhatjuk a rendszert stacioner periodikus jellel, pl. szinuszos gerjesztéssel. Ha a vizsgálat során a rendszerünket nem egyetlen frekvencián, hanem minden frekvencián megvizsgáljuk, akkor válaszként a *frekvencia függvényt*, $G(j\omega)$ -t kapjuk meg. A gyakorlatban a mérést csak korlátozott sávszélességben tudjuk elvégezni. A *frekvencia függvény* egy valósváltozós komplex függvény, melynek szingularitásai a $j\omega$ tengelyen helyezkednek el. A frekvencia függvény a $j\omega$ tengelyt képezi le a komplex számsíkra.

A *frekvencia függvénynek* -mint komplex vektornak- abszolútértéke a $K(j\omega) = |G(j\omega)|$ -amplitúdó karakterisztika, míg a szöge, $\varphi(j\omega)$ az un. *fáziskarakteristikát* adja. Gerjesztésként nem csak harmonikus, hanem tetszőszerinti periodikus jelet is használhatunk. Tágabb értelemben a nem periodikus jel is értelmezhető egy végtelen periódus idejű jelként. A Fourier transzformáció segítségével megkaphatjuk ezen jelek frekvenciatartománybeli képét $F(j\omega)$ -t, vagyis a spektrumát:

$$\mathbf{F}\{f(t)\} = F(j\omega)$$

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt$$

Az inverz Fourier transzformációval a frekvencia-tartománybeli jelből megkapjuk az időtartománybeli képét.

$$f(t) = \mathbf{F}^{-1}\{F(j\omega)\}$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

Az átviteli függvény, mint rendszerjellemező függvény definíció szerint:

$$G(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \quad \forall \omega$$

ahol: $X(j\omega)$ a bemenőjel Fourier-transzformáltja, az $Y(j\omega)$ a válasz Fourier transzformáltja.

5.1.2.3. Komplex frekvenciatartomány

Jelen esetben a rendszert, a komplex frekvencia síkon, $\sigma + j\omega$ -ban írjuk le. Ez azzal az előnnyel jár, hogy a tranziens viselkedés is értelmezhetővé válik. Így a módszer nem stacioner esetben is használható. A konkrét matematikai leírás a Laplace transzformáció segítségével történik. Ez hasonló a Fourier transzformációhoz, csupán abban különbözik, hogy az integráltranszfomáció magfüggvényében a $j\omega$ -helyett $\sigma + j\omega$ szerepel.

$$\mathbf{L}\{f(t)\} = F(s)$$

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \quad \text{ahol: } s = \sigma + j\omega$$

A transzformáció inverziója:

$$\mathbf{L}^{-1}\{F(s)\} = f(t)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\sigma_0 - j\infty}^{\sigma_0 + j\infty} F(s) e^{st} ds \quad \text{Re } s > \sigma_0$$

5.1.2.4. Laplace-transzformáció

Definíció: $p = \sigma + j\omega$ komplex frekvencia

Ekkor, az $f(t)$ függvény Laplace transzformáltja:

$$F(p) = L\{f(t)\} = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt$$

A transzformáció megfordítása, azaz az inverztranszformáció:

$$f(t) = L^{-1}\{F(p)\} = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma - j\infty}^{\sigma + j\infty} F(p) e^{pt} dp, t \geq 0$$

A p változót, a komplex frekvenciát operátorként is kezelhetjük. Az állandó együtthatós lineáris időinvariáns rendszerek leírásánál és számításánál gyakran alkalmazzuk.

A Fourier transzformáció és a Laplace transzformáció alakilag, formailag nagyon hasonló. Formailag, csupán a transzformáció változójában különböznek. Amíg a Fourier módszer, a rendszernek a frekvencia tengelyen való viselkedést tárja fel, addig a Laplace transzformáció a komplex frekvenciában ($p = \sigma + j\omega$) adja meg a fizikai rendszer jellegét. Ez utóbbi, a frekvencia tengelyen való viselkedést, és azon túl a rendszer csillapítására, annak stabilitására vonatkozó információval is szolgál. A stabilitást, a σ függvényében való viselkedésként jellemezi.

Az elmondottak miatt az alkalmazásban ezt figyelembe kell venni. Ha állandósult (stacioner) jelek vagy rendszerek vizsgálatát szeretnénk elvégezni, elegendő a Fourier sor, vagy transzformáltat alkalmazni. De ha például valamely zenei hangjelet vagy koppanás jelét szeretnénk megvizsgálni, akkor már a konvolúció helyett is a Laplace transzformáció alkalmazása indokolt, sőt szükséges is (ezek tranziens jelek).

5.1.2.5. Konvolúciós integrál

Két időtartománybeli függvény konvolúciójának Laplace transzformáltja a két függvény transzformáltjainak szorzatába megy át a komplex frekvencia tartományban.

$$f * g = \int_0^{\infty} f(t - \tau) g(\tau) d(\tau)$$

$$L \{ f * g \} = F(p)G(p)$$

5.1.3. A konvolúció ismertetése

Mit is jelent két tetszőleges jel konvolúciója? Legyen $a=a[n]$ és $b=b[n]$ a két konvolvándó jelsorozat. A $b[n]$ minden pontjához (minden n értékhez) rendelünk egy másolatot $a[n]$ -ből, mégpedig $b[n]$ aktuális pontja szerint skálázva. Az eredményt úgy kapjuk, hogy összeadjuk ezeket a skálázott és eltolts jelsorozatokat.

A konvolúció tehát nem csupán a jelsorozatok szorzatát jelenti! Egyszerű szorzás esetén $kimenet[n]=a[n] \cdot b[n]$ teljesülne, azaz n db szorzásból állna a művelet. Esetünkben azonban az a jel minden mintája (minden egyes értéke) szorozódik b minden mintájával!

5.1.3.1. A konvolúció matematikai definíciója

Legyen adott két jelsorozat: $a=a[n]$ és $b=b[n]$. A sorozatok hossza rendre N és M . Ekkor:

$$a[n] * b[n] = kimenet[n] = \sum_{m=0}^N a[m] \cdot b[n - m]$$

Valójában az a minden mintája a b egy-egy eltolts másolatának súlyozó tényezője lesz. A keletkező súlyozott "visszhangok" mind összeadódnak, és így áll elő az eredmény. A szokásos módja a megoldásnak az úgynevezett *direkt konvolúció*, azaz minden n -re kiszámítják a szumma értékét. Az eredményt általában normalizálják a végén. A konvolúció eredménye mindig hosszabb mindkét bemeneténél.

Tipikus audio alkalmazások a szűrők. Ezek lehetnek például aluláteresztő szűrők, feluláteresztő szűrők, sáváteresztő szűrők és sávszűrők. Ezeknél a szűrő alkalmazásoknál az a tipikusan egy nagyon rövid szekvencia a b -hez viszonyítva (b a szűrendő digitalizált audio jel). Ugyanakkor **a konvolúció kommutatív**,

$$a[n] * b[n] = b[n] * a[n],$$

tehát nem számít, hogy a és b közül melyik a szűrő impulzusválasza és melyik az audio jel.

5.1.3.2. A konvolúció törvénye

A jelfeldolgozás egyik alapvető törvénye, hogy két hullámforma konvolúciója megegyezik a spektrumuk szorzatával. A törvény megfordítva is igaz, azaz, két hullámforma szorzata egyenlő a spektrumuk konvolúciójával. Más szavakkal: **konvolúció az időtartományban megegyezik szorzással a frekvenciatartományban.**

A konvolúció törvényének fontos következményei vannak. Nevezetesen, ha két hanghullámot konvolválunk, az ekvivalens azzal, hogy az egyik hang spektrumát szűrjük a másikéval. Fordítva, ha két audio jelet összeszorozunk (az időtartományon), akkor az ekvivalens azzal, hogy a spektrumukat konvolváljuk. A spektrumok konvolúciója azt jelenti a gyakorlatban, hogy az a bemenet diszkrét frekvenciaspektrumának minden pontja konvolválódik a b spektrumának minden pontjával. A konvolúció nem tesz különbséget spektrum és minták között. Az algoritmusnak mind a kettő csupán diszkrét jelsorozat.

Másik következménye a törvénynek, hogy akárhányszor átformáljuk egy hanghullám burkológörbáját, egyben konvolváljuk a burkológörbe spektrumát az újraformált hang burkológörbéjének spektrumával. Más szóval minden időtartomány-beli transzformáció egy adott frekvenciatartomány-beli transzformációt is eredményez, és fordítva.

5.1.3.3. Szűrés és a konvolúció kapcsolata

A konvolúció közvetlen kapcsolatban áll a szűréssel. Egy általános FIR szűrő (Finite - Impulse-Response) egyenlete a következő:

$$y[n] = (a_0 x[n]) \pm (a_1 x[n-1]) \pm \dots \pm (a_m x[n-m])$$

Az $a_0, a_1, \dots, a_m$ együtthatókat egy h tömb elemeinek is képzelhetjük, ahol a h minden eleme szorozódik a megfelelő x -beli elemmel. Az előző egyenletet a következő formára hozhatjuk:

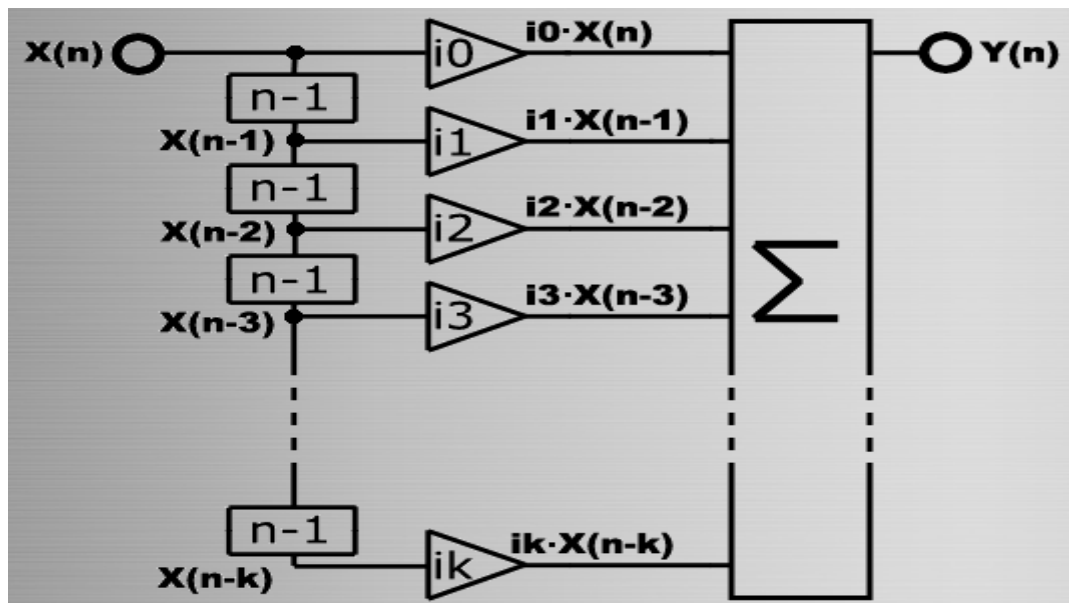
$$y[n] = \sum_{m=0}^N h[m] \cdot x[n-m],$$

ahol N az x elemszáma. A képlet jól láthatóan egy konvolúció. Vegyük észre továbbá, hogy a h együtthatók játsszák az IR szerepét. Egy FIR szűrő impulzusválasza tehát közvetlenül származtatható az együtthatóiból, azaz *bármely FIR szűrő kifejezhető konvolúcióval*, és fordítva.

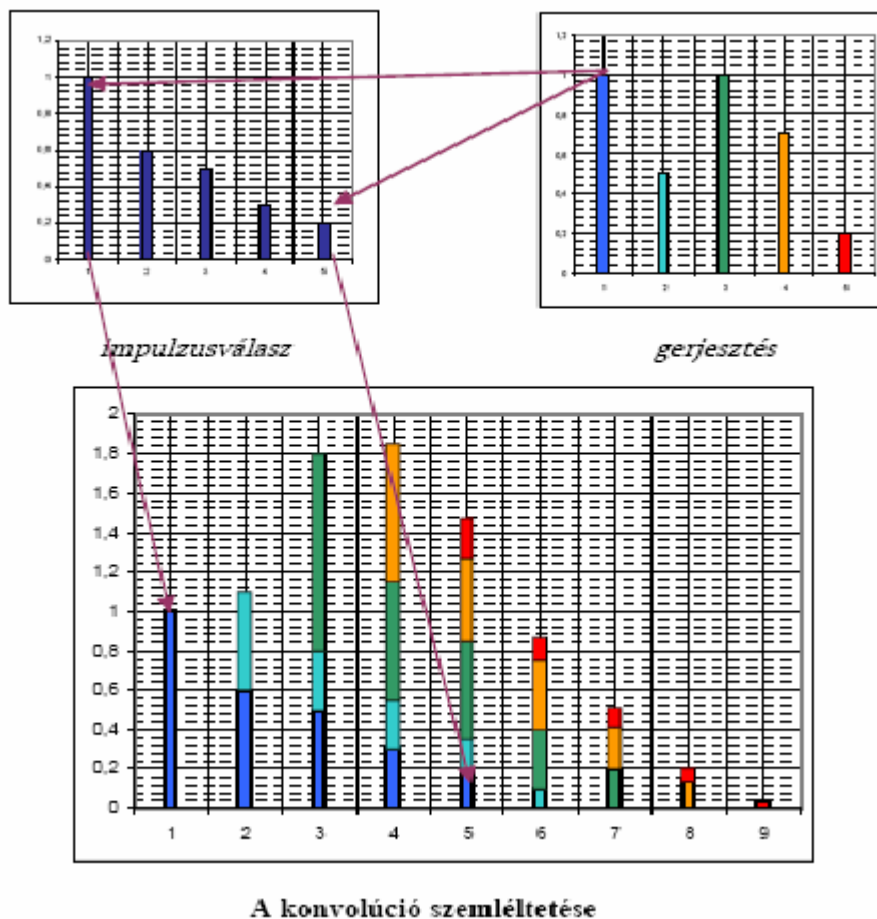
Egy i együtthatós rendszerre értelmezve a konvolúciót, a kiszámolás:

$$Y(n) = i_0 \cdot X(n) + i_1 \cdot X(n-1) + i_2 \cdot X(n-2) + i_3 \cdot X(n-3) + \dots + i_k \cdot X(n-k)$$

Rajzban ábrázolva a folyamat a következő oldalon.



A rendszer linearitása és időinvarianciája miatt a válaszok a gerjesztések megfelelő együttthatóival szorzódnak és időben eltolódnak, majd összegződnek.



A konvolúciós zengetők elve ezen a hálózatelméletből ismert konvolúciós összefüggésen alapszik.

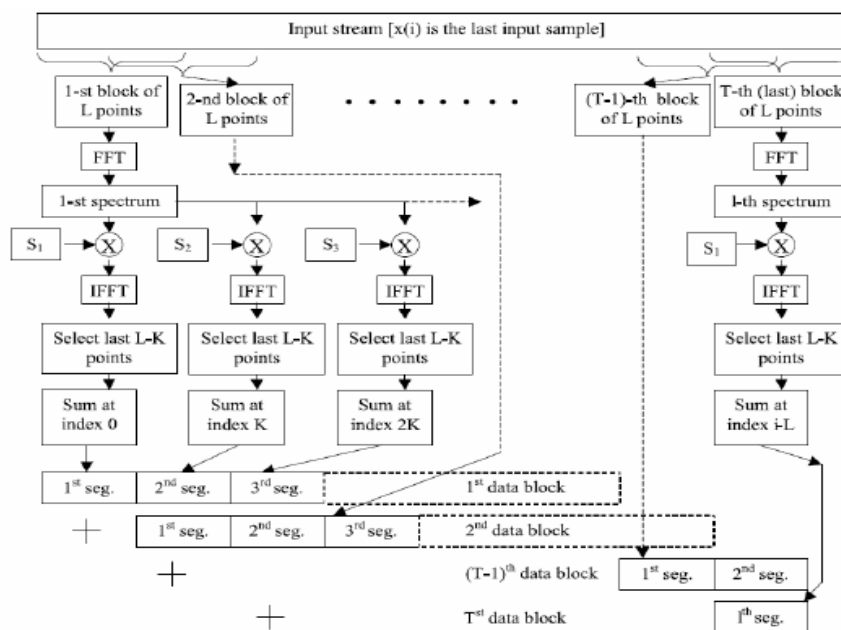
5.1.3.4. Gyors konvolúció

Ha felhasználjuk a diszkrét Fourier-transzformáció képletét a konvolúcióra, azt kapjuk, hogy a konvolúció a Fourier-transzformáltak szorzatának inverz Fourier-transzformáltja, így a konvolúció elvégezhető Fourier-transzformálással is - szorzással. A konvolúció gyakorlati megvalósítása azonban nagyon számításigényes feladat. A számításigény csökkentése és a valósidejűség - vagy kis késleltetés - követelménye egyszerre jelentkeznek. A konvolúciós zengetők megvalósítási módjai a következők:

Módszer	Előny	Hátrány
Időtartománybeli (FIR szűrő)	1 minta késleltetés is megvalósítható	Rendkívül nagy számításigény (jelenlegi jelfeldolgozó processzorokkal nem valósítható meg) és felhalmozódó számítási hibák
Frekvenciatartomány-beli (FFT)	Kisebb számításigény (blokkos kezelés)	A blokkméretnek megfelelő késleltetésű

A fentiekből következik, hogy célszerű, ha az impulzusválaszt blokkokra osztjuk, és a blokkokon hajtjuk végre a konvolúciót, majd a részeredményeket felhasználva állítjuk elő a kimenetet.

A direkt konvolúció az N^2 rendű műveletszámával rendkívül számításigényesnek mondható. (N a hosszabbik bemenet hosszát jelenti.) Emiatt a direkt konvolúciót ritkán használják keskeny sávú szűrőknél vagy zengetőknél (mindkettőnek hosszú az impulzusválasza), amikor más módszerek is kielégítő eredményt adnak. Sok gyakorlati alkalmazás egy gyors konvolúció (Stockham, 1969) nevű metódust használ. A hosszú sorozatokra alkalmazott gyors konvolúció kihasználja a gyors Fourier transzformáció (FFT) azon lehetőségét, hogy két N pontos FFT szorzata megegyezik két N pontos sorozat konvolúciójának FFT-jével. A gyors konvolúció azt jelenti, hogy a direkt konvolúciókat FFT-kre cserélhetjük. Ez a csere drámai gyorsulást eredményez nagy N értékekre. Nevezetesen, a gyors konvolúció $N \cdot \log_2(N)$ rendű műveletet igényel.



Particionált konvolúciós zengető blokkvázlata

5.2. A konvolúció gyakorlati alkalmazása

5.2.1. Hangátviteli függvények

5.2.1.1. HRTF függvények

A hangátvitelt a szabad tér valamely pontjától a hallójárat egy tetszőleges pontjáig különböző beesési irányok esetén a HRTF átviteli függvények írják le (Head Related Transfer Function). Ez a pont általában a dobhártya vagy a hallójárat bemenete. Élő emberen a szondamikrofont a hallójárat bejáratánál helyezzük el (ún. lezárt hallójárat mérési pont). Kimutatták, hogy az itt mért HRTF-k ugyanannyi térbeli információval rendelkeznek, mint a dobhártyán mért függvények. A torzónál a mérőmikrofon a dobhártya helyén van.

A HRTF *komplex* átviteli függvény, ami tartalmazza a tér különböző irányából vett amplitúdó átviteli jelleggörbét, és a fázismenetet (HRPhTF). A fázismenet helyett gyakran annak frekvencia szerinti deriváltját, a (csoport)futásiidőt adjuk meg. Ezen függvények tartalmazzák a felsőtest és a fej geometriájának, valamint a *fülkagyló lineáris szűrő* hatását (reflexió, árnyékolás). A HRTF függvények egy készletet alkotnak, minden térirányhoz létezik egy-egy a bal és a jobb fülhöz is.

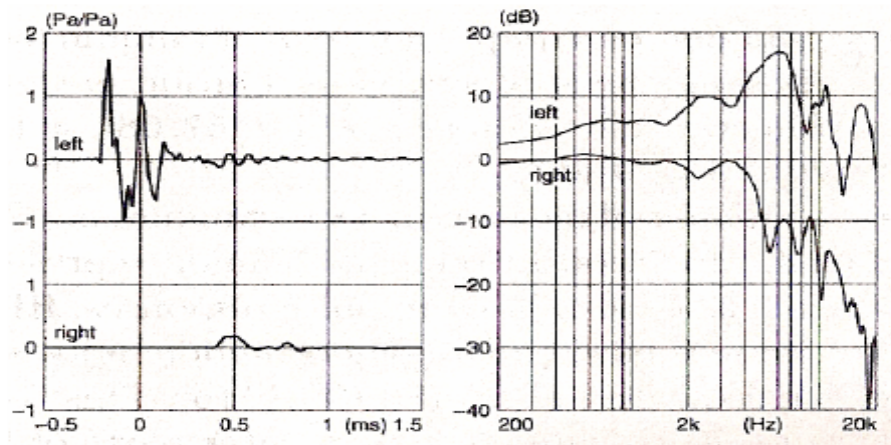
A halláskutatásokhoz mért és modellezett HRTF-ket egyaránt felhasználhatunk. A *szabványos HRTF* olcsó és egyszerű megoldás. A mai napig sem az IEEE, sem az AES nem definiálta a szabványos HRTF függvényt, de a nagyobb szoftver cégek szorgalmazzák e szabvány megalkotását. Ennek oka, hogy piacépes multimédiás alkalmazások és termékek kerülhetnek forgalomba. A függvények az adott irányokból nagy (egyénektől függő) szórást mutatnak, így várhatóan egy esetleges szabványos HRTF (minden irányhoz egy) csak korlátozott alkalmazhatóságú ill. gyenge minőségű lesz, ami nem biztos, hogy megfelel egy multimédiás alkalmazás követelményeinek.

Ennél jobb módszer a *szabványos HRTF függvénykészlet* felhasználása (minden irányhoz több). Ehhez kisebb embercsoporton kell a mérést elvégezni, majd a felhasználóknak lehetősége lesz a számára legjobban megfelelőt kiválasztani (ilyen készlet sem létezik). Ez a megoldás jobb minőséget tenne lehetővé, de hátránya, hogy az előállítás időigényesebb, és a felhasználótól bizonyos felkészültséget, előismerteket vár el, ezért használata bonyolultabb.

A legjobb mérési módszerrel előállított HRTF, az *egyévre érvényes*. Ezeket a függvényeket megfigyelőn kellene lemérni, ami hosszadalmas, kényelmetlen, és drága eljárás, de messze a legjobb minőséget szolgáltatná.

5.2.1.2. HRIR függvények

A HRTF függvények inverz Fourier-transzformáltjai, a HRIR függvények (Head Related Impulse Response) a hallást a térbeliség szempontjából ugyanolyan mértékben jellemzik, de a jelenséget az időtartományban írják le.

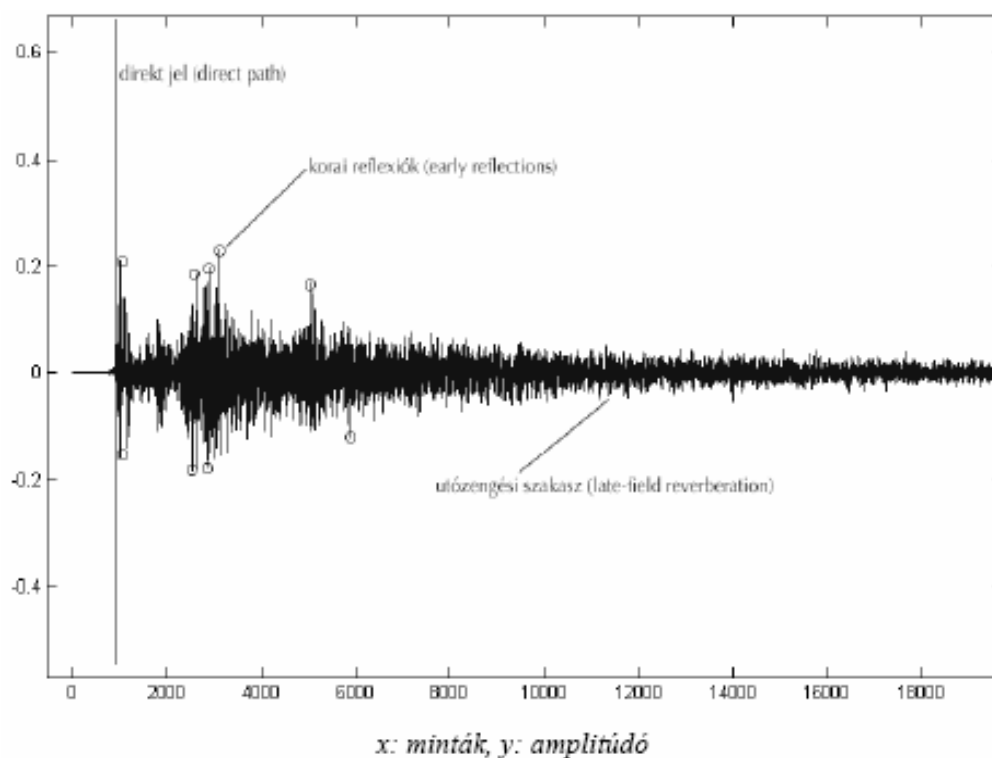


A külső fül rendszerleíró függvényei. Balra az impulzusválasz (HRIR), jobbra az abból számított átviteli függvény (HRTF) a bal és a jobb fülhöz, élő ember blokkolt hallójáratának bejáratán mérve „bal” ($\varphi = -90^\circ$) irányból

5.2.1.3. RIR függvények

Az akusztikai tér két kijelölt pontja közötti átvitelt az impulzusválasszal mint rendszerleíró függvénnyel lehet jellemezni (RIR = Room Impulse Response). Az impulzusválasz ismeretében lehet az akusztikai paramétereket számítani, és az impulzusválaszt kell a konvolúciós zenetők bemenetére adni. Az impulzusválasz közvetlen mérése azonban kielégítő minőségben nem lehetséges, mert az ideális impulzust kellő mértékben megközelítő impulzusgerjesztés kibocsátása nem lehetséges: közvetett mérésre van szükség speciális vizsgálójelekkel.

Ha jól mértük az impulzusválaszt, akkor a mérés eredményeképpen a rendszer adott két pontja közti átvitelt kapjuk meg. Ez időtartományban az alábbiak szerint alakul:



5.2.2. Konvolúció terem impulzusválasz függvényekkel (RIR)

Egy szoba vagy terem impulzusválasza sok impulzust tartalmaz, a helyiségben található hangvisszaverő felületek mennyiségétől, pozíciójától és anyagától függően. Ha ezt az impulzusválaszt konvolváljuk egy tetszőleges hanggal, eredményül olyan hangot kapunk, ami „hallhatólag” a helyiségben szólal meg. Szakszavakkal: **ha az a hangot konvolváljuk egy akusztikus tér impulzusválaszával, majd az eredményt összekeverjük a -val, akkor a végeredmény úgy hangzik, mintha a -t az akusztikus térbe helyeztük volna.**

A még élethűbb hatás kedvéért gyakran sztereó, vagy kettőnél is több csatornás impulzusválaszokat készítenek a vizsgált térben. Ezzel a technikával azután akár monofonikus, azaz egycsatornás audio jelből is létre lehet hozni a „megszólalásig” valóság-hű térhatású jelet. Sztereó rendszer esetén ezt úgy érik el, hogy a „száraz” hangot konvolválják a bal irányban mért IR-rel, valamint a jobb oldali IR-rel is, és az eredményekből állítják össze a sztereó kimenetet.

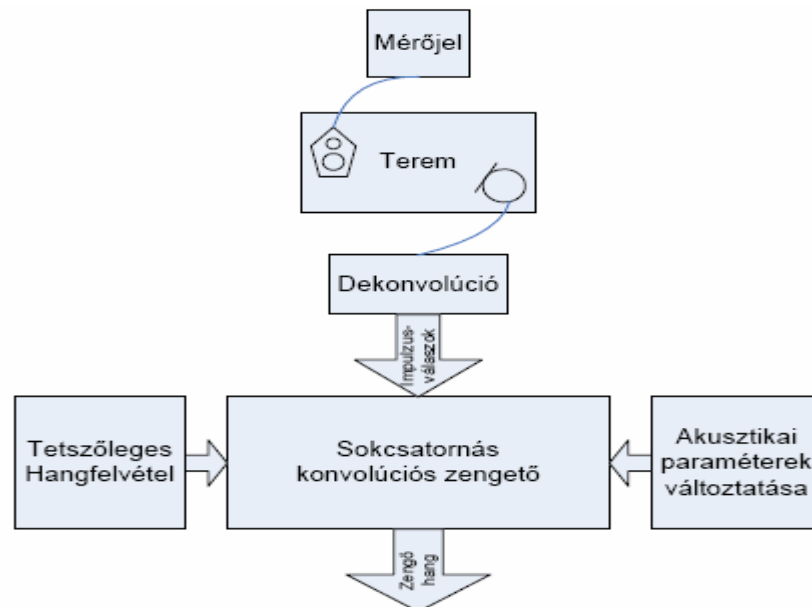
A két mikrofonnal rögzített sztereó impulzusválaszt binaurális (binaural) felvételnek is hívjuk, ami jelentésében a „két füllel hallott” kifejezéssel egyenértékű. Az ilyen felvételeket gyakran bábuk fülébe ültetett mikrofonokkal végzik, hogy minél pontosabban reprezentálják a fülek elhelyezkedéséből adódó emberi hallást.

5.2.3. Az impulzusválasz (RIR) mérésének szabályai

- 1) Rendes körülmények között a forrás és a vevő lehetőleg ne legyen túl közel egymáshoz, de mindkettő reális helyen legyen. A forrás például lehet valahol a színpadon, a mikrofon pedig a nézőtéren, amennyiben egy előadóteremben végezzük a méréseket.
- 2) A forrás hangenergia-sugárzása jól ismert erősségű és irányultságú legyen. Ez jól teljesül az akusztikus térbe helyezett hangszóróknál, de a hangsugárzás iránya például kevésbé ismert a léggömbök kidurrantásával nyert impulzusok esetén (főleg, ha a durrantást végző személy jelentős térszöveget árnyékol le a testével).
- 3) Az ideális akusztikus impulzus definíció szerint végtelenül rövid időtartamú és végtelenül nagy teljesítményű, tehát egységnyi energiájú. Ugyanakkor a hang szóródása, és a mérések szempontjából fontos frekvenciasáv korlátai miatt az ideális impulzus kitételeiből engedhetünk egy keveset, és megelégedhetünk olyan impulzív forrásokkal, amelyek által kiadott jelek elég rövidek ahhoz, hogy csak elhanyagolható mértékben változtassák meg az impulzusválaszt.
- 4) A vevő hangérzékenysége legyen jól ismert mind az irányultság, mind a frekvencia függvényében.
- 5) A keletkező impulzusválaszok a lehető legjobb minőségben legyenek eltárolhatók későbbi vizsgálatokhoz, mégpedig olyan formátumban, hogy jól definiált algoritmusokkal (általában számítógép segítségével) az akusztikus paraméterek leszűrhetők legyenek. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy jó minőségű mikrofonnal és digitalizáló egységgel érdemes dolgozni, legalább 16 (vagy 24) bites felbontás és minél nagyobb mintavételezési frekvencia (48 kHz) mellett.

5.2.4. Konvolúciós zengető

Az impulzusválaszokat a konvolúciós zengetőbe töltjük. A zengető bemenetére adott zengetendő hangjel, az impulzusválaszok és a módosítandó teremakusztikai paraméterek függvényében előállítja a zengett hangot.



Teremakusztikai mérésre épülő konvolúciós zengető rendszer blokkvázlata

Felhasználási lehetőségek:

- Zeneszerzők: virtuális hangszerek (sound samples, virtual instruments)zengetése
- Hangmérnökök: hangstúdióban rögzített hangsávok virtuális térbe helyezése
- Felhasználók: számítógépes játékok, filmek és videók megjelenített tartalomhoz igazodó valószerű hang megjelenítése
- Kutatási alkalmazások: auralizáció, szubjektív tesztek, vizsgálatok
- Egyéb alkalmazások: aktív teremakusztikai beavatkozások.

5.2.5. Fejhallgató kiegyenlítés

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.

A teremakusztikai szimulációnál a manapság alkalmazott elv az, hogy rögzítik az adott terem impulzusválaszát (az ún. Room Impulse Response Function) függvényt, 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.

Tekintettel arra, hogy a HRTF mérésekhez ill. 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 személyen).

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. 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. Az ilyen HRTF készletet ezért nem individuálisnak nevezzük.

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, pld. azzal, hogy a visszajátszáskor a hallgató fejméretét (hallójáratainak távolságát) megadjuk, vagy hogy frekvenciában a spektrumot megfelelő módon módosítjuk. Szembe kell nézni azzal a problémával, hogy igazi emberekkel végzett mérések eredményei eltérhetnek a műfejes mérésektől.

5.2.6. Wave állományok

5.2.6.1. Wave állományok ismertetése

A Wave állományok (másképpen, kiterjesztésként rövidítve: WAV) fontos fájlformátumok a digitális hangfeldolgozásban. Szinte minden hangszerkesztő programnak az egyik alapértelmezett állománya, így az Adobe Audition 1.5-nek is. Az előbbieken tárgyalt impulzusválaszok legtöbb esetben Wave állományokban vannak eltárolva.

A személyi számítógépeken a Windows 3.x megjelenése után tűntek fel a Wav kiterjesztésű állományok. Ezt a formátumot a Microsoft találta ki, a formátumát is ez a cég határozta meg, kifejezetten a Windows multimédiás képességeihez igazodva. A WAV-file-ok a multimédiában a digitalizált hangok szabványos formátumának tekinthetők. A file digitális hanghullámokat ("Wave") tartalmaz.. Manapság a WAV-file-okat elterjedt szabványos formátumként főként Windows alatt használják digitalizált hangok és zajok tárolására.

A WAV-formátum digitális audióállományok egyik adatformátuma. Szemben az MP3 és más adatformátumokkal, a WAV formátum általában nem tömöríti az adatait. Lehetséges viszont tömörített adatok tárolása WAV formátumban. A WAV formátumot (pontos neve:

RIFF WAVE) a Microsoft definiálta a Windows üzemelőrendszer számára "Resource Interchange Format" (RIFF) néven.

5.2.6.2. Wave állományok felépítése

Egy Wav állományban három adatblokk van, ún. chunkok (részek) a következő adatokkal:

- A Riff-rész az állományt azonosítja, mint WAV állományt.
- A formátum-rész néhány jellemzőt tárol, mint pl. a mintavételi frekvenciát.
- A data-részben a tényleges adatok vannak.

A Riff fejléccel kezdődik:

- Offset hossz tartalom
- 0 4 byte 'RIFF'
- 4 4 byte <állomány hossza – 8>
- 8 4 byte 'WAVE'

A formátum-rész a minta formátumát írja le:

- 12 4 byte 'fmt '
- 16 4 byte 0x00000010 // fmt-adatok hossza (16 Byte)
- 20 2 byte 0x0001 // Formátum-mutató: 1 = PCM
- 22 2 byte <channels> // Csatornák: 1 = mono, 2 = sztereo
- 24 4 byte <sample rate> // Mintavételek száma másodpercenként: pl. 44100
- 28 4 byte <bytes/second> // Mintavételi arány * Block-Align
- 32 2 byte <block align> // Csatornák * Bit/Sample / 8
- 34 2 byte <bits/sample> // 8 vagy 16

A data- (adat-) részben a mintaadatok vannak:

- 36 4 byte 'data'
- 40 4 byte <adatblokk hossza>
- 44 bytes <adatok>

6. Szimuláció Adobe Audition programmal

A szimulációkhoz illetve megfigyelésekhez az Adobe Audition 1.5 programot használtuk. A következőkben ennek ismertetése, majd a beállítások és szimulációk taglalása következik.

6.1. Adobe Audition 1.5 program ismertetése

Az Adobe Audition 1.5 a Cool Edit Pro program közvetlen leszármazottja. 2003-ban az Adobe Systems bejelentette a digitális audioeszközök fejlesztő Syntrillium Software technológiai eszközeinek felvásárlását. A Syntrillium vezető terméke, a Cool Edit Pro az Adobe professzionális digitális videó termékcsaládjához csatlakozik, amelybe az Adobe PDF Premiere, az Adobe After Effects, az Adobe Encore DVD és az Adobe Photoshop tartozik.

Az Adobe Audition 1.5 egy professzionális igényű, de egyszerűen kezelhető hangszerkesztő program, amely felhasználók széles körében terjedt el. Otthoni, hobbiszintű felhasználásoktól a fejlett stúdiótechnikáig mindenhol alkalmazzák. Az Adobe Audition segítségével akár 128

csatornát kombinálhatunk, szerkeszthetünk egyedi hangfájlokat, készíthetünk loop-okat (loop = valamely hosszabb vagy rövidebb ideig tartó hang állandó ismétlődése). Több, mint 45 DSP (digital signal processing = digitális jelfeldolgozás) effektus, szűrő és audioretusáló eszköz segíti munkánkat. Az Adobe Audition könnyen használható, mégis mesteri szinten készíthető vele zene, rádióműsor, mix, vagy bármely más hanganyag.

6.1.1. Az Adobe Audition 1.5 szolgáltatásai

A Cool Edit Pro-hoz képest új szolgáltatások jelentek meg:

Az Adobe Audition 1.5 Frequency Space szolgáltatása tartalmazza a Spectral View-t, amellyel a felhasználók vizuálisan elkülöníthetik és kiválaszthatják azokat a hangokat, amelyek egy adott ideig egy frekvencia tartományban vannak, illetve ezeket a hangokat effektezhetik vagy szerkeszthetik. Ezzel meg lehet tisztítani egy telefoncsörgéssel tönkretett interjút, vagy emelni lehet a professzionálisan rögzített felvételek hatását.

A Pitch Correction eszközzel a felhasználók javíthatnak a hamis énekhangokon és a hangmagasság alapján különleges hatásokat készíthetnek. Az automatikus Click/Pop Eliminatorral egyszerűen megtisztíthatjuk a hangokat, az új Center Channel Extractor pedig az ének és a hangszerek relatív hangerejét keverve korrigálja. Az Adobe Audition 1.5 változathoz több, mint 500 új, nem jogdíjas előállítású végtelenített zenét és 20 mintafelvételt kapunk.

A ReWire hangátvitel támogatással az Adobe Audition 1.5 kiválóan együttműködik a ReWire-re felkészített alkalmazásokkal. A VST bővítmény támogatással több ezer külső effekt áll az Adobe Audition felhasználók rendelkezésére, akik megoszthatják VST effektjeiket az Adobe Premiere Pro felhasználókkal. Továbbfejlesztették az Adobe Audition videó támogatását is - a videó filmcsíkok megjelennek a Multitrack View-ban, az Adobe Premiere Pro 1.5 vágójelei az AVI filmekkel együtt átjönnek, és az Auditiont nagyon sok videó formátum támogatásával egészítették ki, filmfeldolgozási célra.

Az új CD Project View egyszerűvé teszi a lemezek megírását és a projektek ellenőrzését, vagy kész audió CD-k készítését. Az új Clip Time Stretching szolgáltatással a felhasználók bármely audióklipet a szélek vizuális húzogatójával Multitrack View-ban a hangmagasság érintése nélkül egy adott hosszúságra állíthatnak be. A testre szabható preroll és postroll betekintőkkel a felhasználók a szerkesztéseket azok környezetében hallgathatják meg.

6.1.2. Az Adobe Audition 1.5 funkciói

Hangminőség-kiválasztás:

Felvételnél, szerkesztésnél, mixelésnél kiváló minőség érhető el a 32 bites fájlokkal. Mintavételezés akár 100 MHz felett is lehetséges, de beépítésre kerültek a leggyakoribb mintavételezések is (44.1 kHz, 88.2 kHz, 96 kHz, 192 kHz). Készíthetjük hanganyagainkat a 24 bit/96 kHz DVD-kész formátumra.

DSP eszközök:

Dolgozhatunk több, mint 45 DSP-eszközzel (Digital Signal Processing = digitális jelfeldolgozás), és effektussal, szabályzó- és analíziseleszközzel, audioretusáló funkciókkal. Az Adobe Audition támogat más külső DirectX plug-in-eket is.

Precíz mintavétel-konvertálás:

Mintavétel-konvertálást használhatunk a tökéletes hang érdekében. Ideális a 44.1 - 48 kHz-es CD-hez, vagy akár a 96 kHz-es DVD-hez is.

Valós idejű hangszerkesztés:

Az effektusokat valós időben dolgozhatjuk fel. A kisebb processzorteljesítmény-felhasználás érdekében a hangot a program lezárja, és a gyorsmemóriából (cache) rendeli hozzá az effektusokat.

Tökéletes illeszkedés az Adobe Premiere és After Effects programokkal:

Az Adobe Premiere Pro és az Adobe After Effects programokból hangokat importálhatunk. Használható az Edit Original parancs, amivel módosíthatók az eredeti WAV-fájlok, majd importálhatók a változások az Adobe Audition-be.

Többcsatornás kódolás (Multichannel encoder):

Használhatunk többcsatornás kódolót, így bármilyen többcsatornás hangból készíthetünk tökéletes surround-élményt (a surround-rendszer azt az illúziót kelti, mintha a hangok minden irányból érkeznének).

Komplett hangszerkesztés:

Az Adobe Audition programban megtalálható a beépített többcsatornás mixelő ablak, monó és sztereó hullámszerkesztő, hanghatások és loopolási lehetőség.

Párhuzamos csatornák:

Egymás mellett akár 128 sztereócsatorna szerkeszthető, mixelhető, vehető fel. Külön minden egyes csatornán lehetséges hangerőszabályozás, pan, effektusok, EQ (Equalization=kiegyenlítés), stb. Egymás mellett más-más csatornában lehetséges a wav, MIDI, avi, és más egyéb hang is.

Hangok filmekhez:

Megnyithatunk AVI fájlokat a többcsatornás ablakban, és képkockáinként szerkeszthetjük őket az Audition programban. Készíthetünk új hangokat a filmhez, lágyabbá tehetjük a már meglévő hangot, csökkenthetjük a zajt, stb.

6.1.3. Az Adobe Audition kezelőfelülete

A kezelőfelületnek két alapvető ablaka van: egycsatornás szerkesztő (Edit View), illetve többcsatornás szerkesztő (Multitrack View).

Edit View

A bejelentkező ablak az egycsatornás hangszerkesztő ablaka (Edit View). Ebbe kell egymás után behívni a használandó hangfájlokat. Itt már csak wav kiterjesztésű (tömörítetlen) fájlokat kell használni. Az egyes behívott fájlok nevei a windows menüpontban láthatók/válthatók.



A teljesség igénye nélkül, csak a feladat szempontjából lényeges funkciók kerülnek ismertetésre. A program kezeli a számítógépen található hangkártyát, ennek segítségével hanganyagok felvételére ill. lejátszására képes. A felvett anyagok fájlba menthetők, hogy azokat egy későbbi feldolgozás, szerkesztés vagy netán egy egyszerű lejátszás céljából később ismét visszatölthessük.

A program fontosabb feldolgozó funkciói: hanganyag visszafordítása, amplitúdó torzítások, késleltetések (visszhang), különböző típusú szűrőzések, konvolúció, frekvencia spektrum analízis, valamint időbeni gyorsabb/lassabb torzítások.

A program elindítása: az operációs rendszer bootolása után kattintsunk a *Start /Programok/Adobe Audition 1.5* ikonra, vagy indítsuk el az Asztalon az ikonról.

File menü:

Kilépés a programból: *File/Exit* parancs.

Korábban tárolt hangfájl betöltése feldolgozás (szerkesztés) céljából: *File/Open* parancs.

Új hanganyag rögzítése előtt létre kell hozni egy üres fájlt (*File/New* parancs), melynek során meg kell adni a mintavételi frekvenciát, a csatorna számot: mono/sztereo, ill. a digitalizálás felbontását: 8/16/32 bit.

Hanganyag rögzítése: magnóknál megszokott gomb segítségével. A program bal alsó sarkában található ez a gombcsoport, egérkurzort föléjük helyezve sárga sűrű tájékoztató funkciójukról.



View menü:

A program főablakában a betöltött vagy újonnan felvett hanganyag jelalakját láthatjuk (*View/Waveform view*). Ez egy időtartománybeli nézet, az egyes minták értékeit egyenes szakaszokkal köti össze a program. A vízszintes tengelyen a minták sorszáma látható *View/Display Time Format/Samples*, vagy a korábban megadott mintavételi frekvencia segítségével a program idő értékekké skálázza át a tengelyt *View/Display Time Format/Decimal*. A +, – nagyítók segítségével az időskála tetszőleges mértékben zoomolható, egészen addig a mértékig, hogy az egyes minták jól elkülönülve látszanak. Ekkor a minták egérrel megfoghatók és értékük húzogatással változtatható. Kétszeri egérekattintásra a minta értékét dialógusablakban leolvashatjuk, vagy állíthatjuk.

A jobboldali függőleges tengelyen a minták értékei láthatók (például: egy előjeles 16 bites szám –32768 és +32767 között vehet fel értéket). Ezt a skálát is zoomolhatjuk a jobboldali + és – nagyítók segítségével.

A hanganyag spektrogramját tanulmányozhatjuk a főablakban, ha átkapcsolunk a *View/Spectral View* nézetre. Figyelem: a spektrogram egy kétváltozós függvény, és nem tévesztendő össze a spektrummal, amely egyváltozós. A vízszintes tengely skálája továbbra is mintaszám (vagy idő), a függőleges frekvencia, míg a spektrogram értékét a főablak adott pontjának színmélysége adja.

Effects menü:

A betöltött vagy újonnan felvett hanganyag tetszőleges tartománya egér segítségével kijelölhető. Az ezután ismertetésre kerülő feldolgozó funkciók erre a kijelölt tartományra vonatkoznak.

Effects/Invert – Funkció, –1-el szorozza a kijelölt minták értékeit.

Effects /Reverse – A kijelölt tartomány mintáit időben megfordítja.

Effects/Amplitude/Amplify/Fade – Időben lineárisan (logaritmikusan) növekvő/csökkenő módon állítja az amplitúdót. Zeneszámok bevezető ill. záró részeit szokták ezzel a funkcióval kezelni.

Effects/Amplitude/Dynamics Processing/Graphic – A hanganyag dinamikája állítható ezzel a módszerrel, amely tulajdonképpen az amplitúdó-átvitel transzfer függvényét módosítja. Elérhetjük ezáltal pl. hogy a kisebb amplitúdójú (halkabb) hangokat jobban erősítsük, mint a hangosabbakat. Ezáltal dinamika kompressziót érünk el. Az átviteltechnikában gyakran használt módszer, hogy az adóoldalon dinamika kompressziót, míg a vevőoldalon dinamika expanziót alkalmaznak úgy, hogy a két transzfer karakterisztika szorzata 1 legyen. Ezáltal a jelátvitel torzításmentes, viszont az átviteli csatornában a halkabb hangok is magasabb amplitúdóval utaznak, ezáltal sokkal érzékenyebbek a zajokkal szemben.

Effects/Amplitude/Envelope – Egy burkológörbe karakterisztikát állíthatunk be, amellyel a kijelölt hanganyagot szorozza.

Effects/Amplitude/Normalize – A kijelölt mintákat konstans értékkel szorozza, ezenkívül alkalmas pl. DC szint kiküszöbölésére (vagy netán hozzáadására), valamint sztereó felvétel esetén azonos csatorna szintek beállítására.

Effects/Amplitude/Pan Expand – Csak sztereó esetén működik ez a funkció, a balansz értéke időben állítható. Pl. mono vonatzakatolást másolunk egy üres sztereó file mindkét csatornájára, majd alkalmazzuk ezt a funkciót úgy, hogy a vonat “átmenjen” egyik oldalról a másikra.

Effects/Delay Effects/Delay – A kijelölt hanganyagot adott idővel késlelteti, és meghatározott súlyfaktoriall összegezi az eredetivel. Kiválóan alkalmas mesterséges visszhangosítás előállítására.

Effects/Delay Effects/Multitap Delay – Sokszorosan összetett visszhangeffektusok generálására alkalmas.

Effects/Delay menü tartalmazza még a **Full Reverb**, **QuickVerb**, **Reverb**, **StudioReverb** effekteket is, amivel egy általunk megadott tér impulzusválasza szimulálható. Részletezésük külön fejezetben lesz.

Effects/Filters/FFT Filter – Grafikusan megadott frekvenciakarakterisztikával torzítja a hanganyag spektrumát.

Effects/Filters/Scientific Filters – Bessel, Butterworth és Czebisev típusú szűrők közül válogathatunk. Mindhárom típus lehet alul-, felül-, sáváteresztő ill. sávzáró. Megadható a szűrők alsó/felső vágófrekvenciáinak értéke, ill. a digitális szűrők fokszáma.

Effects/Special/Convolution – Számunkra legfontosabb rész. Előzőleg kijelölt hanganyag megadható a konvolúciós műveletnek, mint konvolváló impulzus. Ezután kell kijelölni a konvolválendő hanganyagot és elvégezni magát a konvolúciót. Részletezése külön fejezetben.

Analyze menü:

Analyze/Frequency Analysis – A kijelölt tartomány frekvenciaspektrumát számolja. Állítható az FFT méret, ezáltal a frekvenciatengely felbontása.

Analyze/Statistics – Pl. hisztogramot számol az egyes amplitúdók előfordulási gyakoriságáról, de leolvashatjuk a min. ill. max. minta értékét, a felvétel offsetjét (DC szintjét), valamint teljesítményét.

Multitrack View

Arra alkalmas, hogy egymással egyidejűleg különféle hangok szólaljanak meg, pl. beszéd alatt zene, effektek stb. A sokcsatornás keverő csatornánként külön hangszínszabályzást tesz lehetővé, ami hasznos bővítés. A file/edit menük alatt levő kis ikonra kattintva kerülünk át a sokcsatornás keverő modulba (multitrack view):



Itt kattintunk rá valamelyik hangsávra, a másik egérgombbal válasszuk az insert menüt, és válasszuk ki, mely hangot szeretnénk erre a hangsávra tölteni. Ugyanezt ismétljük a többi sávval (lefelé), amíg minden szükséges hang be nincs töltve. (Ha a bal oldalon megjelennek a fájlnevek, ezeket *drag and drop* módszerrel be is húzhatjuk a megfelelő sávra.) Az egyes wav fájloknak egységes mintavételezésének érdemes lenniük (ideálisan 44100 Hz mintavétel). A gép mindig az elsőként behívottat tekinti alapnak és minden később behívott fájlt ennek a mintavételnek megfelelőjévé konvertál (néha nem túl szépen hangzón).

A hangsávon belül a fájlok (hangok) mozgatása a másik egérgomb folyamatos lenyomásával lehetséges (feltéve, ha a fenti ikonok közül a *hybrid tool* nevű eszközt jelöltük ki). Így át is lehet dobni a hangot egy másik sávba. A hangfájl közepén vízszintesen végighúzódnó kék vonal megfogásával és fel-le tolásával a sztereó egyensúly állítható (középen szól vagy máshol), a hanghullám tetején futó élénkzöld vonalra klikkeléssel pedig a hangerő szabályozható kézzel egy hangfájlon belül: hangosítható, halkítható, fade-elhető stb. Itt állítható be pl. egy zenére rábeszéléskor, hogy a rábeszélés alatt mennyire halkuljon el a zene.

Kijelölés, kivágás stb: a kijelölt részre kell a másik (jobb) egérgombbal kattintani. Erre bejön egy menü, itt ezt tehetjük:

- Lock in time: odarögzíti az adott ponthoz a hangot, nem tudjuk véletlenül odébbpöccinteni.
- Splice: a kijelölt rész határain a hangot feldarabolja, azaz lesz egy előtte, egy ő maga (a kijelölés) és egy utána levő hangfájl-részlet, melyek szabadon mozgathatók.
- Trim: mindent levág, kivéve a kijelölt részt (előtte-utána kivágja a hangot).
- Cut: a kijelölt részt vágja ki, az előtte-utána lévő meg hagyja.
- Remove wave: a kijelölt hanghullámot kitörli a hangsávból.

Mindez egyszerűbben: ctrl+k lenyomásával a kijelölt helyen vágópontot illeszt be (split). Két vágóponttal tudunk egy részt kivágni, a kivágandó részt kijelölve a delete gomb megnyomásával.

Ha összehúzogattunk minden hangdarabkát: edit→ mix down to file→ all waves: ez egy hangfájllá mixeli a sokcsatornás anyagot, amit rögtön meg is nyit a hangszerkesztőben, és ez elmenthető, majd konvertálva mp3-má kész a műsorunk.

6.2. Teremimpulzus-válasszal végrehajtott konvolúció

A konvolúció lényege, hogy egy már meglévő impulzusválaszt egy hangfájllal összekonvolválva virtuális hangzást állítsunk elő. Lássuk, hogyan működik ez az Adobe Audition 1.5 használatával, lépésenként leírva.

Mindez konkrét példán bemutatva szemléletes, így az "alap" hangfájl céljaira jelen esetben Luciano Pavarotti: 'O Sole Mio zeneszámát választottam. A választás tulajdonképpen véletlenszerű, azért pont Pavarottira esett a választás, mert a telt énekhangon jól bemutatatható a konvolúció okozta változás. Szomorú aktualitása is van: a nagy énekes nemrégiben elhunyt, így mintegy rá emlékezve választottam.

Elő akarunk állítani egy hangfelvételt, ami úgy szól, mintha Pavarotti a milánói Scala operában adná elő az 'O Sole Mio számot. Ehhez adott:

A stúdióban felvett eredeti zeneszám: Luciano Pavarotti - 'O Sole Mio.mp3

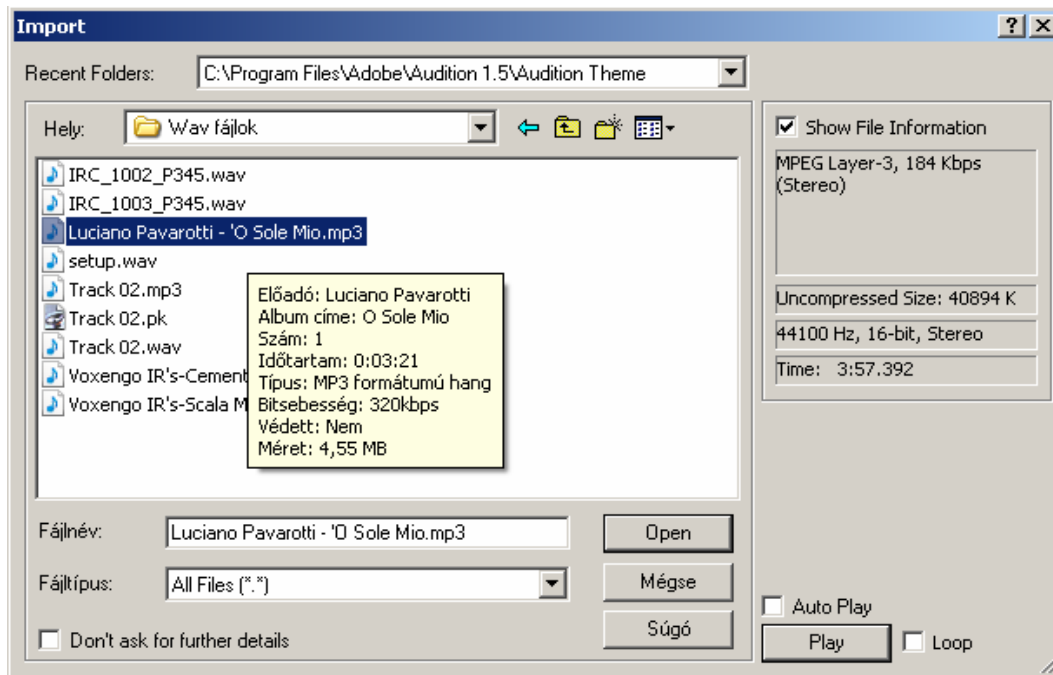
és a milánói Scala terem impulzus-válaszfüggyvénye: Scala Milan Opera Hall.wav.

Legjobb, ha Wav állományaink vannak, mert az Audition többek között ezt a formátumot támogatja. A napjainkban elterjedt tömörített mp3 formátum is használható természetesen, de ezt az Audition beépített fájlkonvertáló segédprogramjával át kell alakítanunk Wav állománnyá. Mivel itt az eredeti hangminta mp3 formátumú, szükségünk lesz egy átalakításra is. Ezt a megfelelő helyen részletezem.

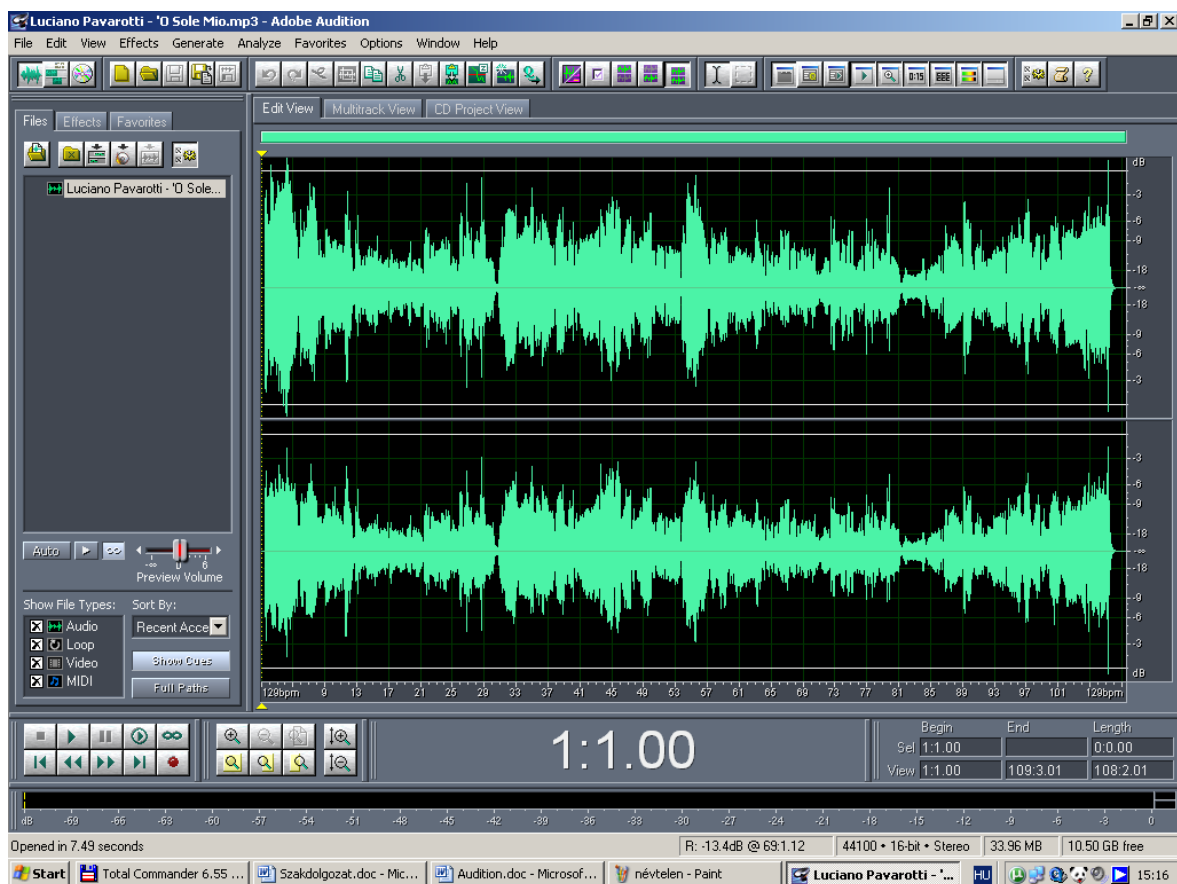
Innentől lássuk lépésenként a hangfelvétel-előállítás.



- Az Adobe Audition 1.5 a  ikonra kattintva vagy a Start menü-> Programok-> Adobe Audition-ra kattintva indul.
- Az Edit View nézet állítandó be a munkaterületen.
- A baloldalt lévő fájlkezelő ablakban megnyitjuk az eredeti hangmintát (másképpen a File/Open paranccsal lehet):



Itt az Open gombra kattintva megjelenik a fájlkezelő ablakban a hangminta. Erre ráklikkelve a munkaterületen látható lesz a hangminta időfüggvénye:

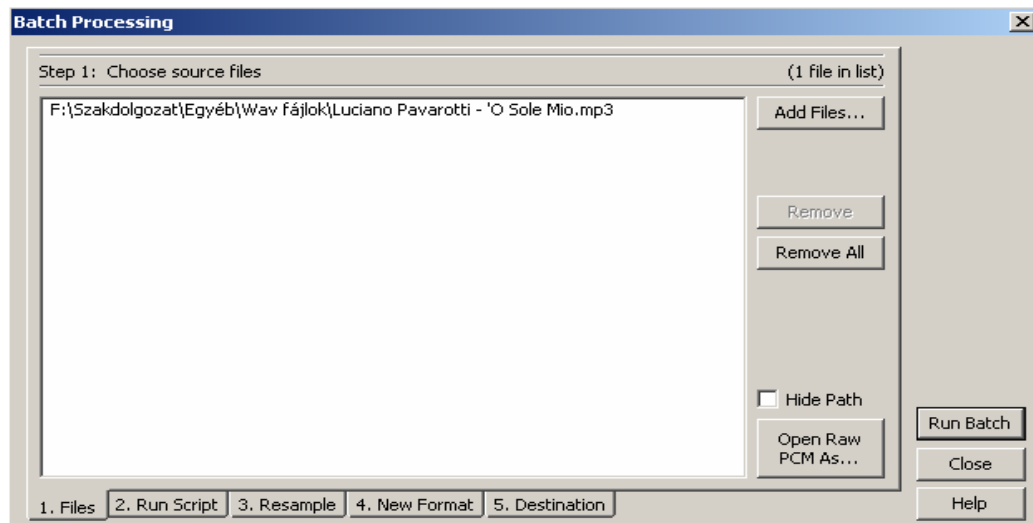


Lévéen hogy a hangminta sztereó felvétel volt, a program feltünteti a bal csatornát (munkaterületen felül látható), és a jobb csatornát (munkaterületen alul van).

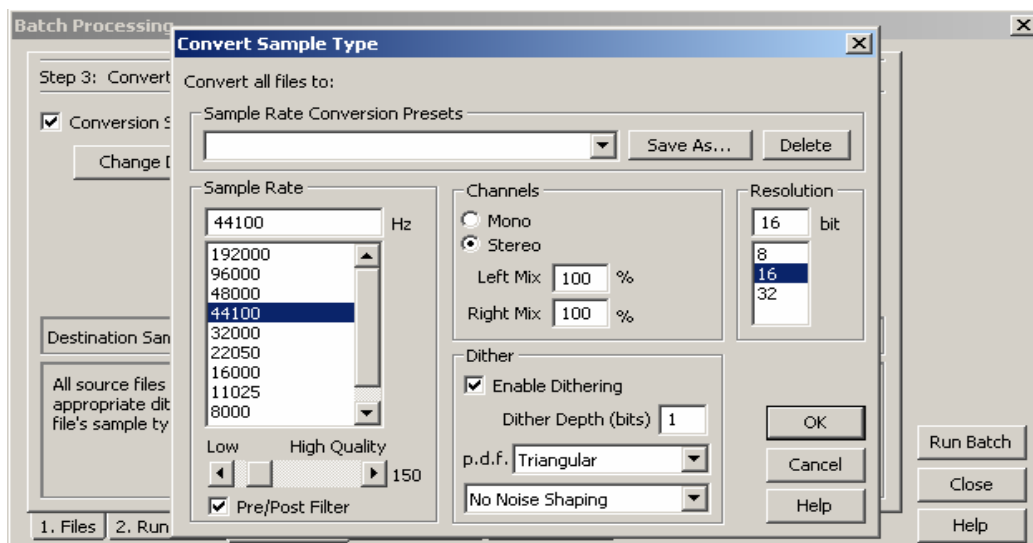
- A bal alsó sarokban található lejátszásvezérlővel a felvételt lejátszhatjuk:



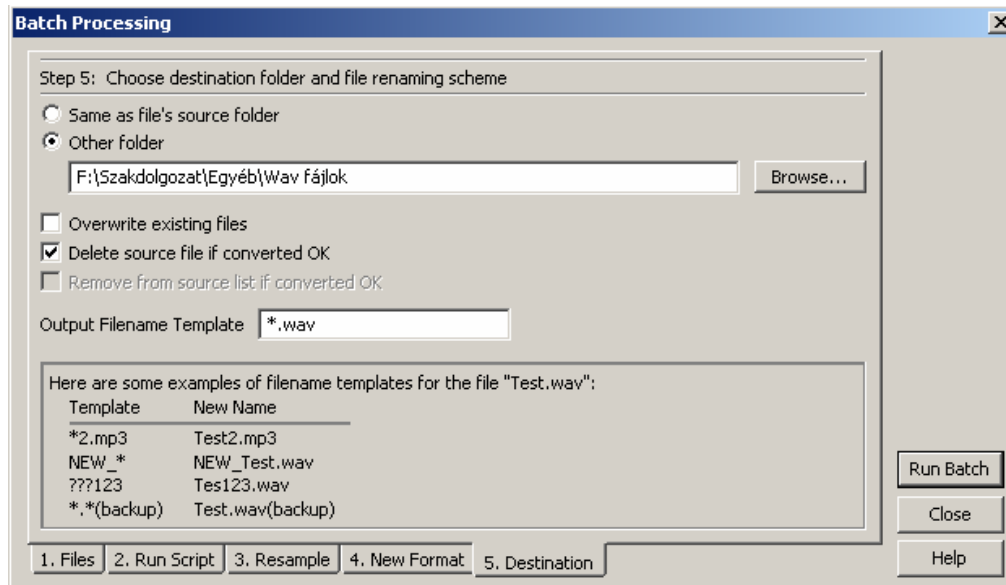
- A hangmintát ezután átkonvertáljuk a feldolgozásra alkalmas Wav formátumúra: File menü/Batch Processing. A megjelenő ablakban egymás után 5 lépést hajtunk végre. Ezek a lépések az ablak alján kis "füleken" vannak.
 - Add files: itt hozzuk be az ablakba az átkonvertálandó állományt/állományokat, jelen esetben: Luciano Pavarotti - 'O Sole Mio.mp3. Kiválasztjuk, majd az Add gombot lenyomjuk.



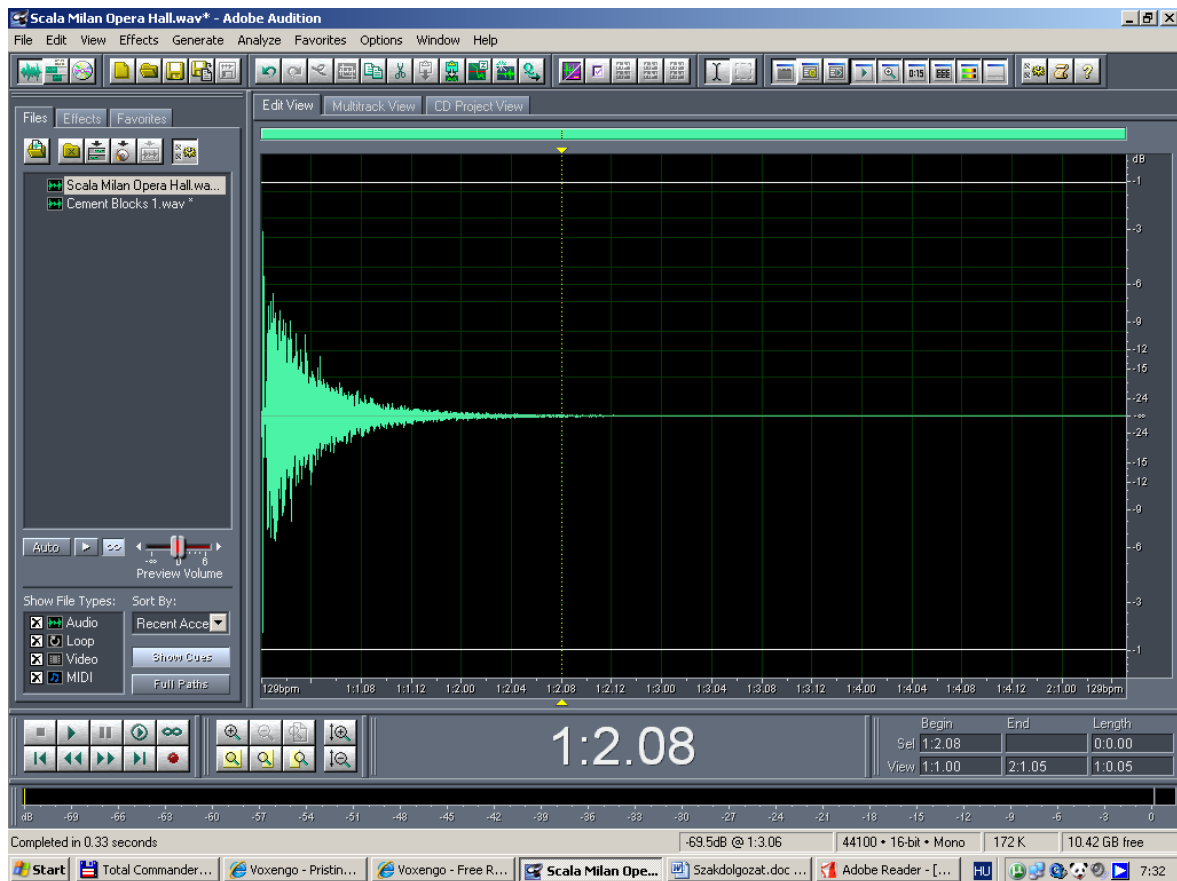
- Itt egy szkriptet futtathatunk az adott fájlal/fájlokkal együtt, ezt általában nem vesszük igénybe. Jelen esetben sem.
- Resample: itt a Change Destination Format gomb megnyomásával egy új ablak tűnik fel, ahol a mintavételi frekvenciát, bitmélységet, csatornaszámot, illetve zajt állíthatjuk be a létrehozandó új állományon. Jelen esetben változatlanul hagyjuk a 44,1 kHz-es mintavételt, a 16 bites mélységet, stb.



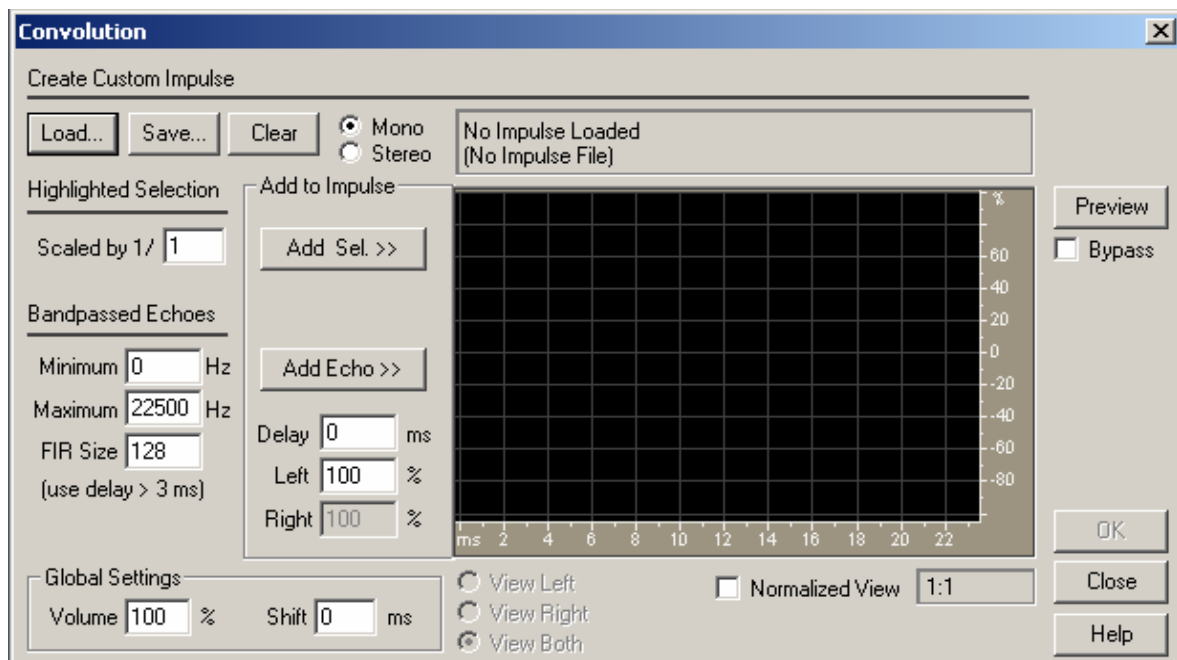
4. New Format: itt választjuk ki, milyen formátumba akarjuk a hangmintát konvertálni. A Format Properties gomb megnyomásával egy ablakban módosíthatjuk az adott formátum beállításait, az előző lépéshez hasonlóan (több formátumot nem enged módosítani). Itt a Windows PCM (*.wav) formátumot választjuk ki.
5. Destination: itt kiválaszthatjuk a célmappát, felülírhatjuk a már meglévő hasonló nevű és kiterjesztésű állományokat, az eredeti mintát törölhetjük vagy a listából eltávolíthatjuk. A Run Batch gombra kattintva megtörténik a konverálás, melynek állapotát (hogyan tart) állapotsáv jelzi. Végén Completed Batch Processing üzenetet ír ki.



- Mindezen műveletek elvégzése után a hangminta tetszés szerint alakítható az Audition előző fejezetekben ismertetett számos alkalmazással, de erre itt most nem térek ki, mert a feladat szempontjából lényegtelen.
 - Következik az impulzusválasz megnyitása a fájlkezelő ablakban, hasonlóan ahhoz, ahogy az előbbiekben a hangmintát megnyitottuk. Ráklíkkelve megjelenik a munkaterületen az impulzusválasz időfüggvénye. Fontos, hogy a további néhány művelet alatt is ez látszon a munkaterületen.
Ez nem egyéb, mint egy mono wave fájl. Ezzel fogjuk összekonvolválni a hangminát, hogy megkapjuk az általunk előállítani kívánt hangfelvételt. Jól elkülöníthetők a teremakusztikai elméleti résznél tárgyalt felépítői: a direkt hang, az első reflexiók illetve az utóhang.
- Az impulzusválasz időfüggvénye a következő oldalon látható.

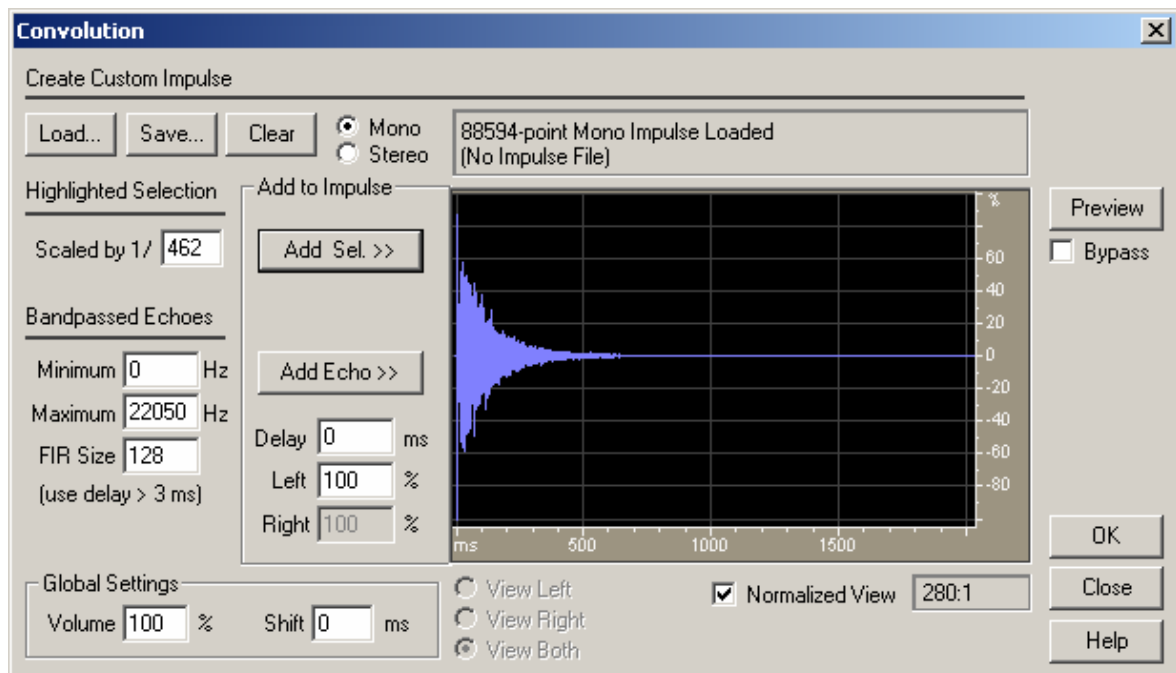


- Az Effects menü/Special/Convolution alkalmazást megnyitva megjelenik ez az ablak (lásd a következő oldalon):



Itt kattintsunk felül a Clear gombra, hogy megszabaduljunk az esetleges előzőleg már megnyitott impulzusválaszoktól. Érdeemes megfigyelni, hogy a munkaterületen az impulzusválasz időfüggvénye az ablak megnyitásakor automatikusan kijelölődött!

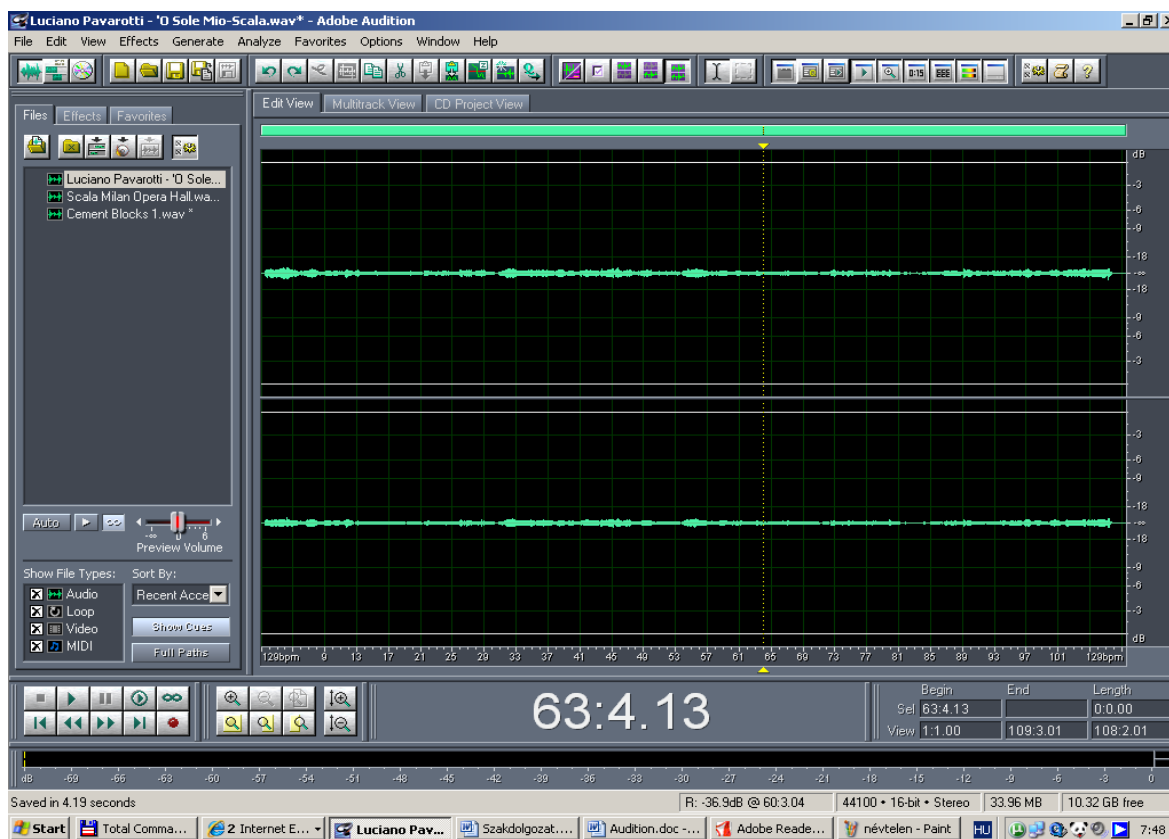
- Ugyancsak felül válasszuk ki az impulzusválaszunk csatornaszámát: Mono/Stereo. Jelen esetben mono wave állomány az impulzusválasz, tehát ennek megfelelően választunk.
- Az Add Sel gombbal a fekete ablakba feltölthetjük az automatikusan kijelölődött impulzusválaszt.
- Nyomjuk meg a Save gombot, így a .wav kiterjesztésű állományt az Audition számára impulzusválaszként feldolgozható belső .imp formátumuként mentjük el. A fájl nevére rákérdez, tetszőlegesen írhatunk be. Az Italia-Scala Opera nevet választottam. Ezzel berakódik az Audition Imps mappájába, így ezt ott kell keresnünk, ahová az Auditiont feltelepítettük.



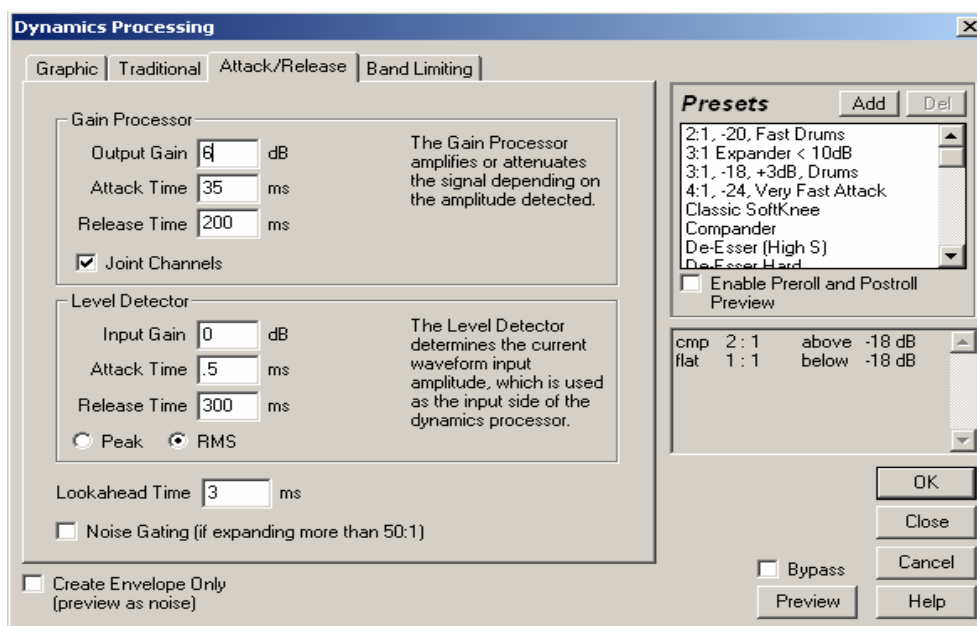
Látható, hogy a kis fekete képernyőn megjelent a hullámalak, a képernyő felett látható adatok pedig tanúskodnak arról, hogy valami mégiscsak történt: felvette az impulzusok közé a program.

- Ezután bezárhatjuk a Convolution alkalmazás ablakát (Close).
- Ezután az Edit View módban ráklikkelünk a fájlkezelő ablakban az eredeti hangmintára, hogy megjelenítsük az a munkafelületen.
- Az Effects menü/Special/Convolution alkalmazást megnyitjuk újra. Itt a konvolúciós ablakban a Load gombra kattintva, majd e megjelenített állományok közül kiválasztva feltöltjük az előzőekben .imp formátumként mentett impulzusválaszt: Italia-Scala Opera.imp. Mindeközben a munkaterületen automatikusan kijelölődik a hangminta (jobb és bal csatorna egyaránt). Ha nem az egész mintára, hanem annak egy részére vagy csak az egyik csatornára akarjuk alkalmazni a konvolúciót, jelöljük ki a kívánt részt/részeket.

- Az OK gombbal elindul a konvolúció, majd egy állapotosáv végigfutása után megmutatja a kész időfüggvényt. Az eltérés jól látható, főleg ha a 35. oldalon látható eredeti hangminta-időfüggvénnyel összehasonlítjuk.



Előfordulhat, hogy az így előállított felvétel jóval kisebb hangerejű (illetve kisebb amplitúdójú) lesz az eredetinel. Ez jól látható a mostani példán is. Ilyen esetben az alap amplitúdóértéket kell magasabbra állítani, de van egyszerűbb megoldás: a kimeneti erősítést változtatni. Ehhez az Effects menü/Amplify/Dynamics Processing alkalmazást kell elindítani. Erre megjelenik egy ablak:



A Gain Processor-nál lehet átállítani a kimeneti erősítést (Output Gain). Ezt most a példánál maradván nagyobbra kellett venni, de tetszés szerint állítható. 20 dB-nek vettem.

- Mentés: File menü/Save as menüponttal. Itt írhatjuk be a felvétel nevét, jelen esetben: Luciano Pavarotti - 'O Sole Mio-Scala.wav. Abban a mappában, ahová elmentettük, azonos névvel és .pk kiterjesztéssel is létre fog hozni egy fájlt. Ezzel készen is van a hangfelvételünk, ami úgy szól, mintha Pavarotti a milánói Scalában énekelne.

Lássuk most egy másik példán, hogy milyen eredményt ad az, amikor azt a helyzetet próbájuk szimulálni, mintha egy kisméretű templomból hallgatnánk az Pavarottinak ugyanezen zeneszámát.

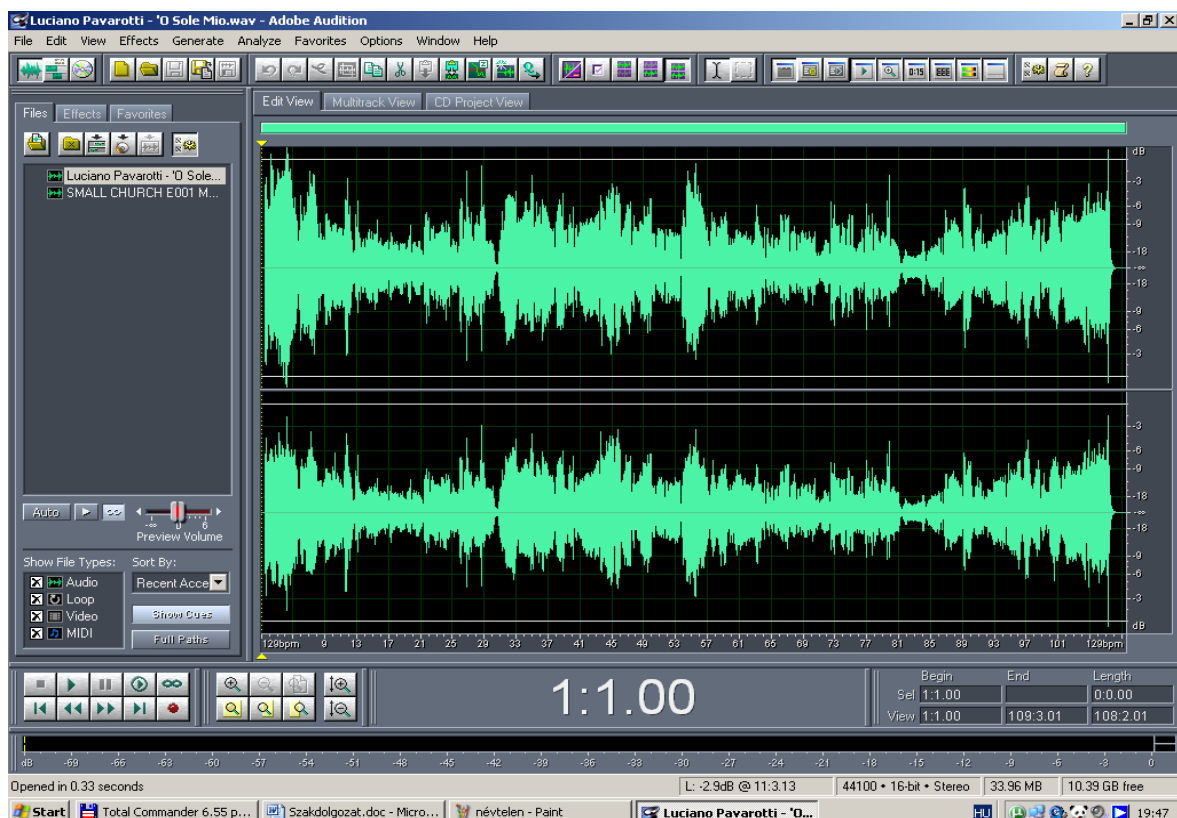
Az előbbieken leírtak szerint vannak ennek a feladatnak a lépései is.

Hangminta: Luciano Pavarotti - 'O Sole Mio.mp3

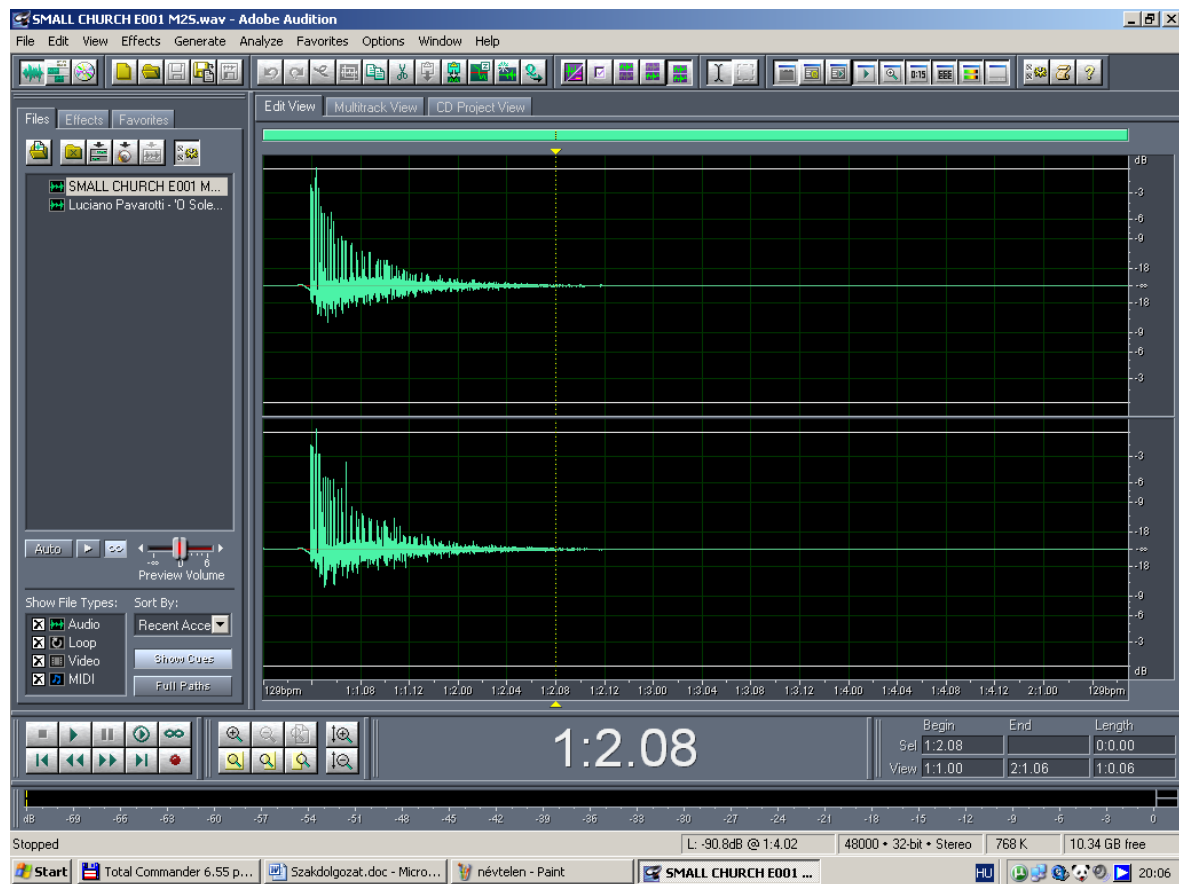
Impulzusválasz, melyet egy kis templomban vettek fel: SMALL CHURCH E001 M2S.wav

Mindezekből a kimeneti, általunk előállított felvétel: Luciano Pavarotti - 'O Sole Mio-Church.wav.

Az itt használt impulzusválaszt szabványos formátumban, azaz Windows PCM Wav formátumban mentették. Ezt az Audition minden konvertálás nélkül használni tudja, csak a .imp formátumban való elmentését kell megcsinálni konvolúció előtt, ez előbbieken leírtaknak megfelelően. Felvet viszont egy másik problémát: a feladatban mono wave fájlokat kell(ene) használni mint impulzusválaszokat. Ez egyszerűen megoldható, a következőkben tárgyaljuk. A megnyitott hangminta időfüggvénye:

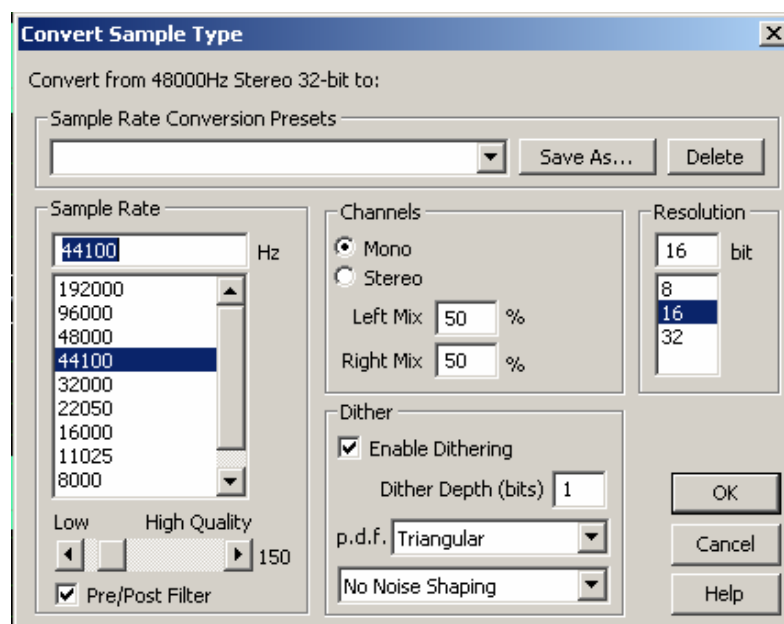


A sztereó, de mono-ként alkalmazott impulzusválasz időfüggvénye:

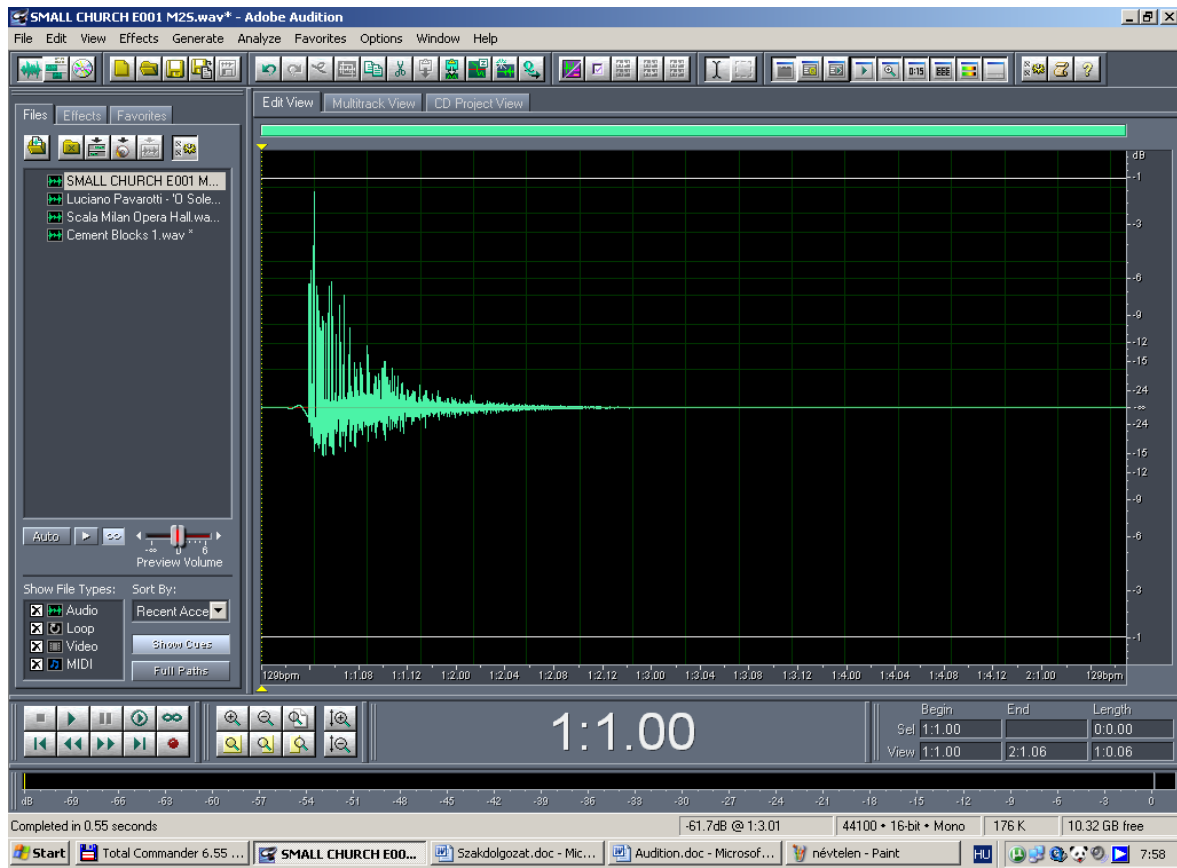


Láthatjuk a jellegzetes sztereo jelformát. Átalakítása mono-ra a következőképpen történik:

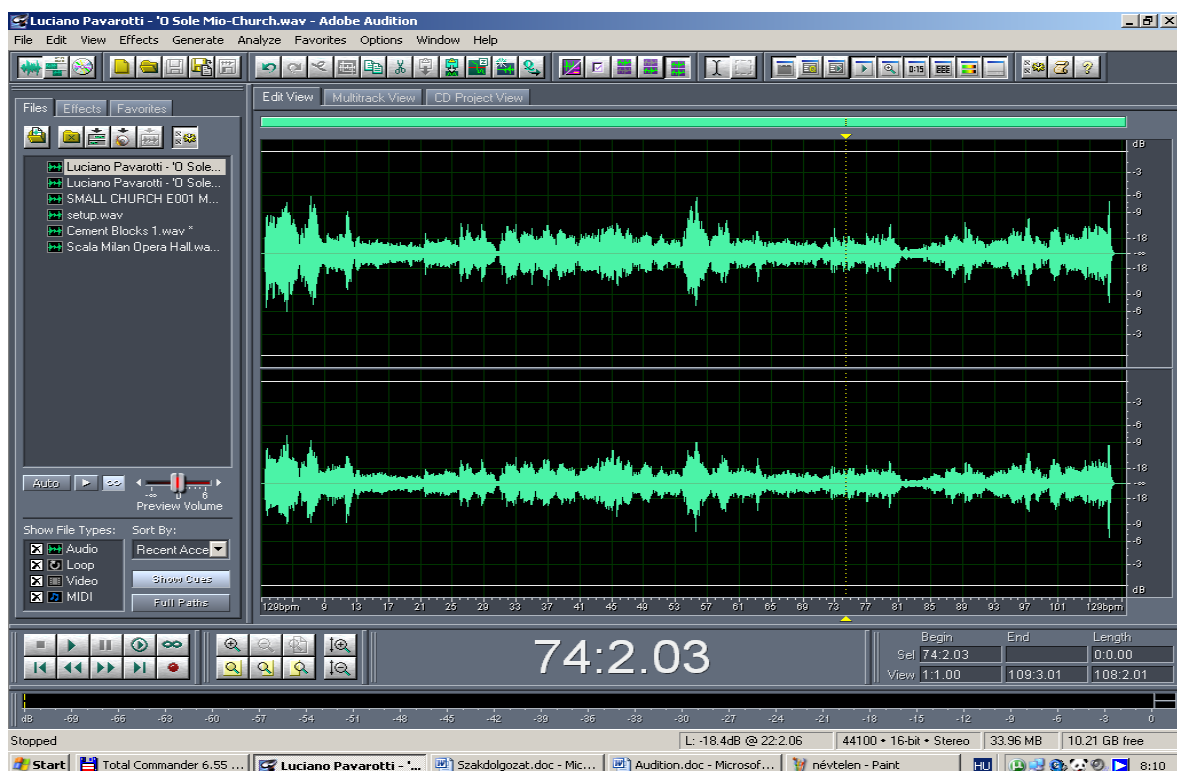
- Edit menü/Convert Sample Type
- Ez kiad egy ablakot, ahol a Channels felirat alatt be tudjuk állítani: Mono, majd az OK gomb hatására végrehajtódik a művelet.



Az ilyen módon egy csatornássá tett impulzusválasz:



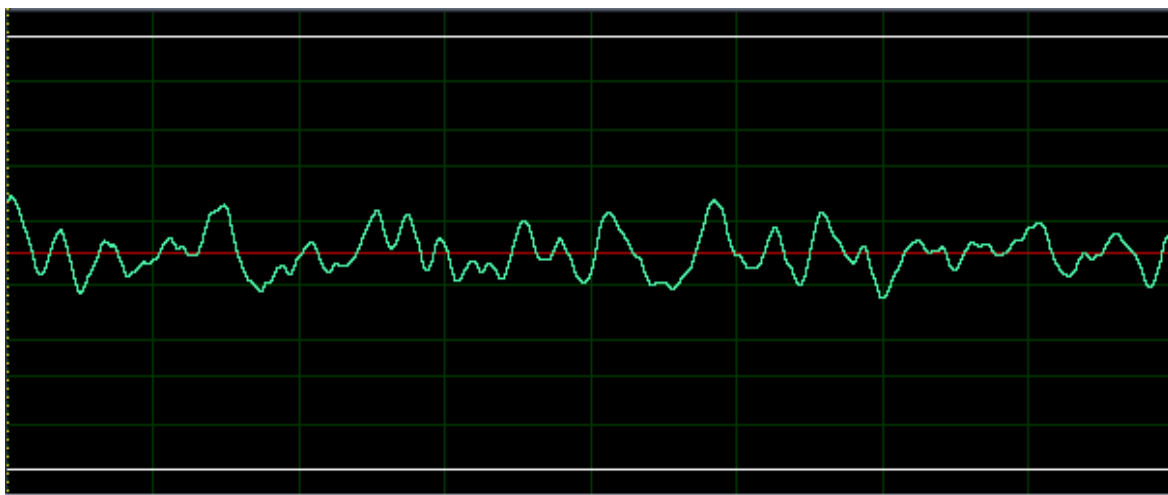
Mindezek után a konvolúció előző példánál leírt végrehajtásával így néz ki a végleges hangfelvétel, miután a kimeneti erősítést 20 dB-re választottuk:



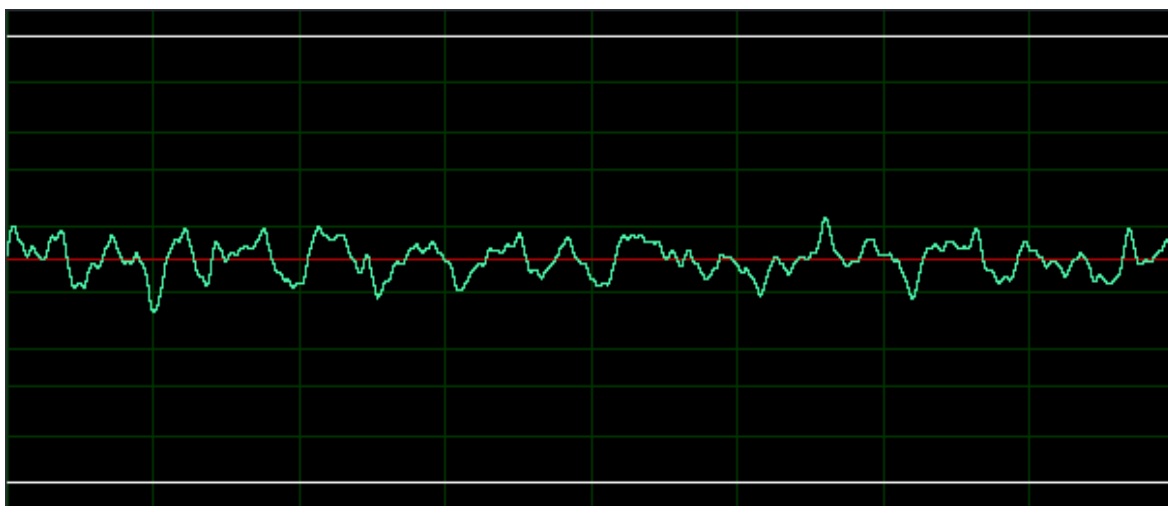
Bár a két, konvolúcióval előállított hangfelvétel időfüggvénye az ábrákon csak alig tűnik eltérőnek, jó minőségű hangsugárzókkal lejátszva észrevehető a különbség. De ezt a különbséget szemléltessük is a felvételek ugyanazon részletének kinagyításával. Az Audition képernyő jobb alsó sarkában tudjuk a legprecízebben beállítani a kijelölést, kezdő- és végpont megadásával:

	Begin	End	Length
Sel	1:4.10		0:0.00
View	1:4.10	1:4.12	0:0.02

Luciano Pavarotti - 'O Sole Mio-Scala.wav egy részlete kinagyítva:



Luciano Pavarotti - 'O Sole Mio-Church.wav ugyanazon időpontok közötti részlete kinagyítva:

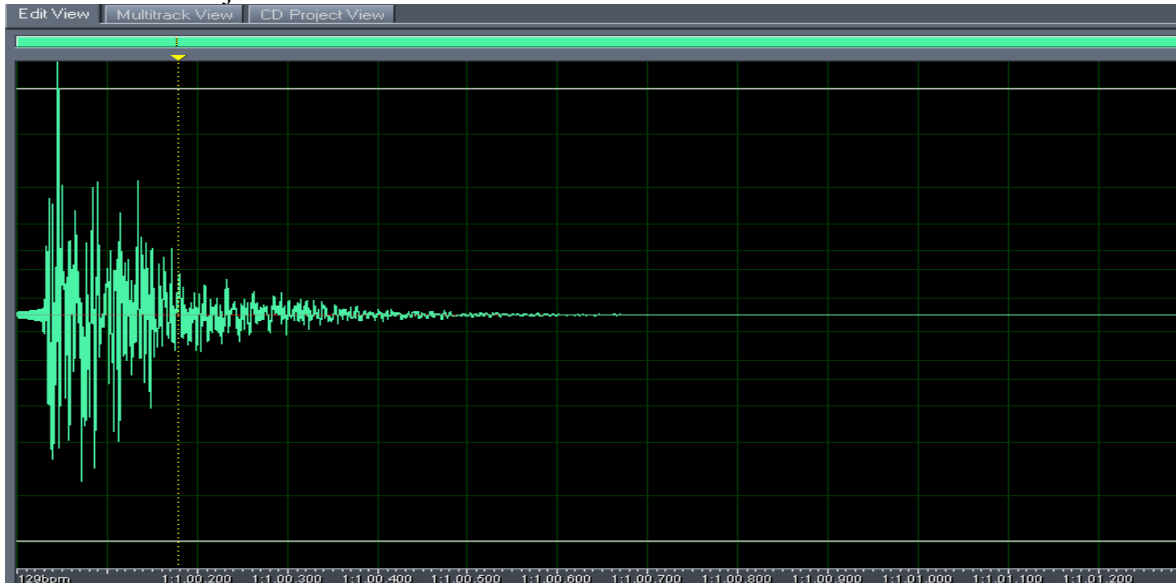


A nagyított részleteken világosan látszik, hogy az eltérő impulzusválasszal való konvolúció alapvetően hasonló, de részleteiben mégis eltérő hullámformákat eredményezett. Ami azt bizonyítja, hogy a leírt konvolúciós művelet eredményesen használható az általunk hozott "külső" impulzusválaszok esetén.

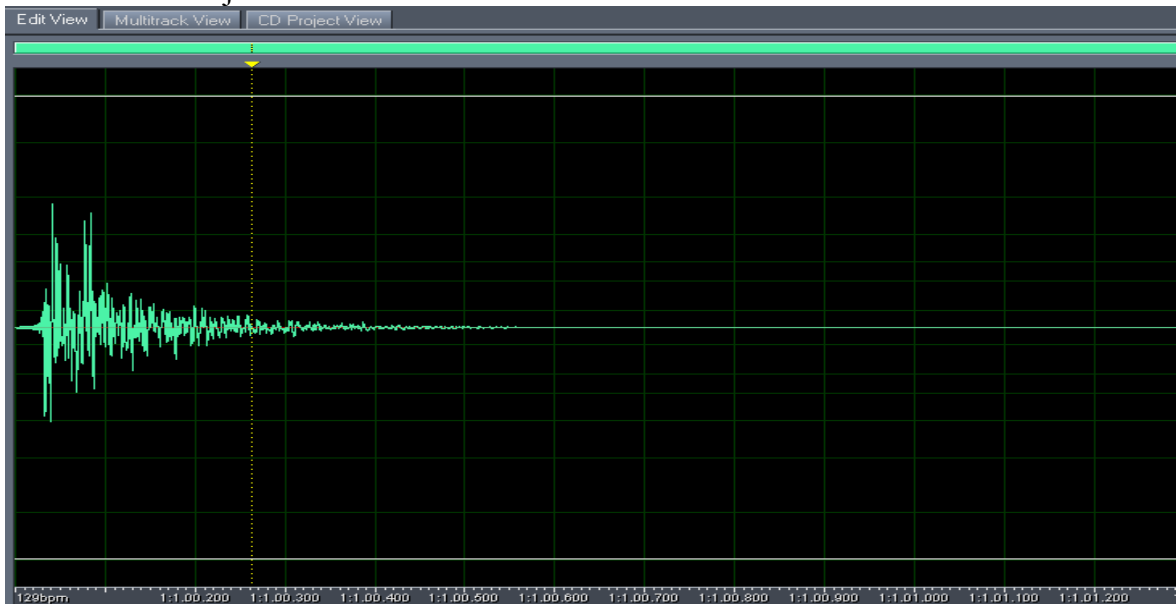
6.3. Kisebb terek szimulációja

Ebben a szimulációs feladatban annak szemléltetése a cél, hogy egy mono zenei hangminta miként módosul, ha a hangmintát egy kisméretű szobában hallgatjuk. Ehhez a megfelelő impulzusválaszok:

Small Room N1-jobb.wav:



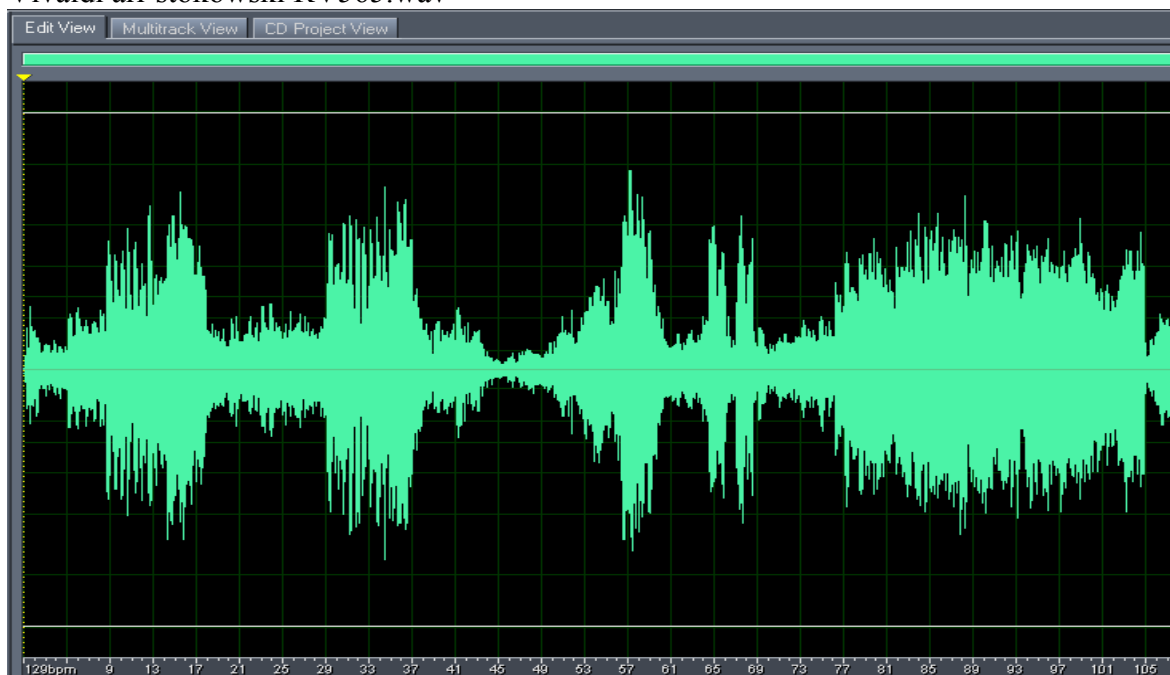
Small Room N1-jobb.wav:



(A továbbiakban csak a jobb csatornás impulzusválasszal konvolvált mintát szemléltetem, mert a ballal való munkafolyamatok teljesen ugyanazok.)

Hangmintának - amit össze kell konvolválni az impulzusválasszal - ebben a feladatban is egy klasszikus zenei számot választottam (természetesen lehetett volna bármi más zenei felvétel is). Itt egy Vivaldi-számról esett a választás, amely mono zenei felvétel volt.

Vivaldi arr stokowski RV565.wav

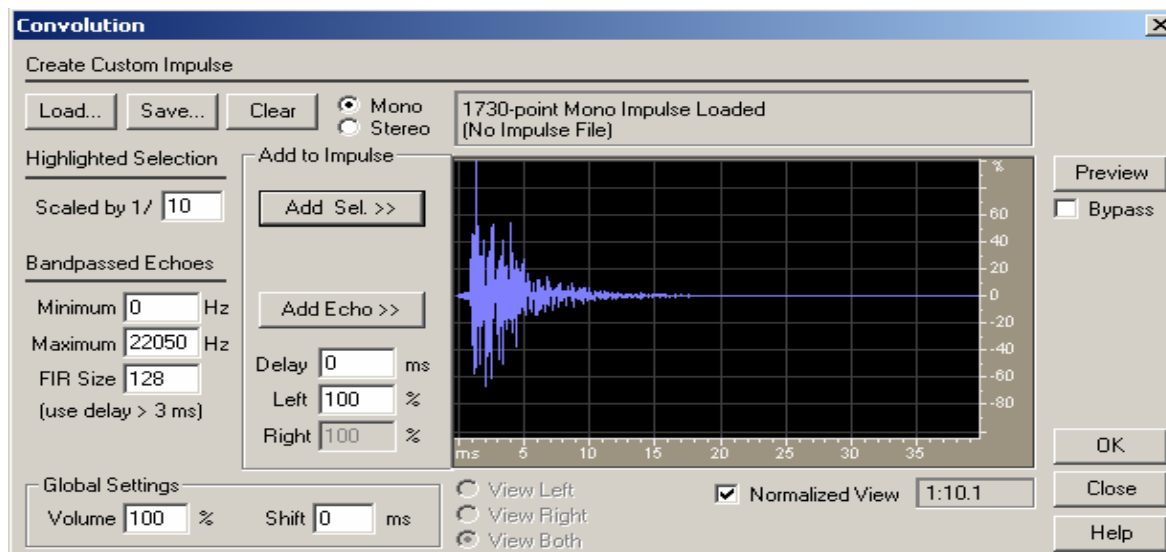


A konvolúciót jelen esetben külön hajtjuk végre a mono zenei felvételen a jobb, illetve bal csatornás impulzusválasszal. Az itt elvégzendő műveleteket nem részletezem, hiszen a 6.2. fejezetben részletesen leírtam. Ilyen módon kapunk egy bal, illetve jobb csatornás szimulált hangfelvételt, amiből az Audition szerkesztő segítségével - egyszerű másolási/beillesztési műveletekkel - gyárthatunk egy sztereó felvételt. Ez azt szimulálja, hogy a zeneszámot egy panellakás kisméretű szobában hallgatjuk.

Szemléltetés kedvéért a jobb csatornás impulzusválasszal konvolvált hangminta:



Érdekességgéppen a konvolúciós ablakban megjelent hullámalak, amit a program felvett az impulzusválaszok közé:

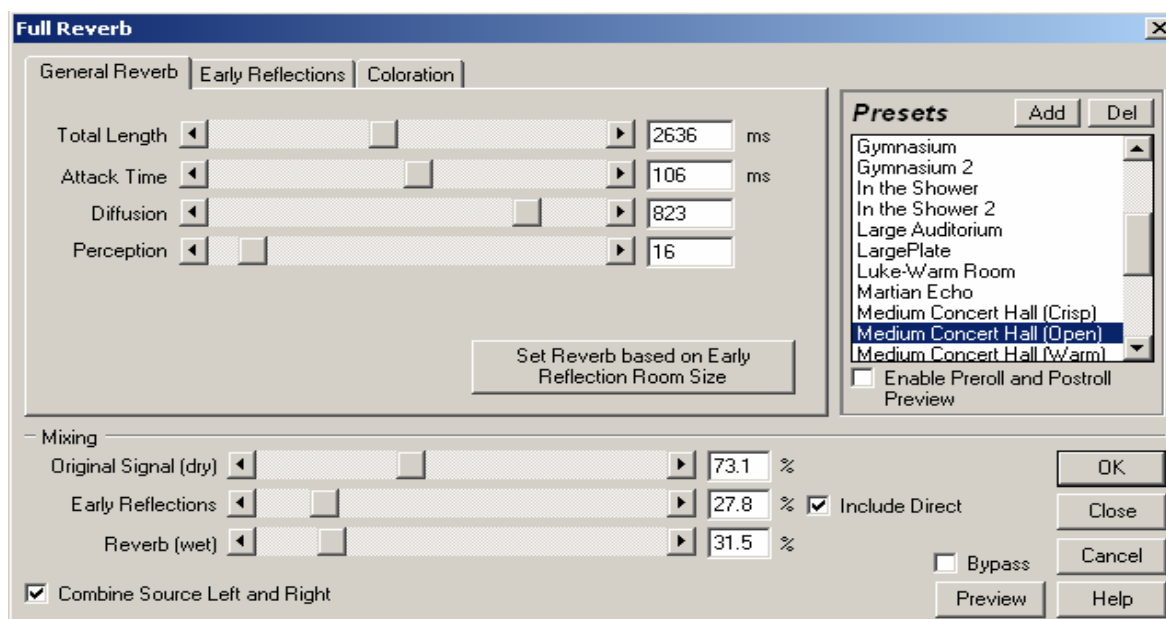


6.4. Az Adobe Audition beépített konvolúciós alkalmazásai

Létezik a programnak néhány (szám szerint 4 féle) egyéb konvolúción alapuló, illetve azzal rokon alkalmazása, amelyeket az Effects menü/Delay Effects almenüben találhatunk.

6.4.1. Full Reverb

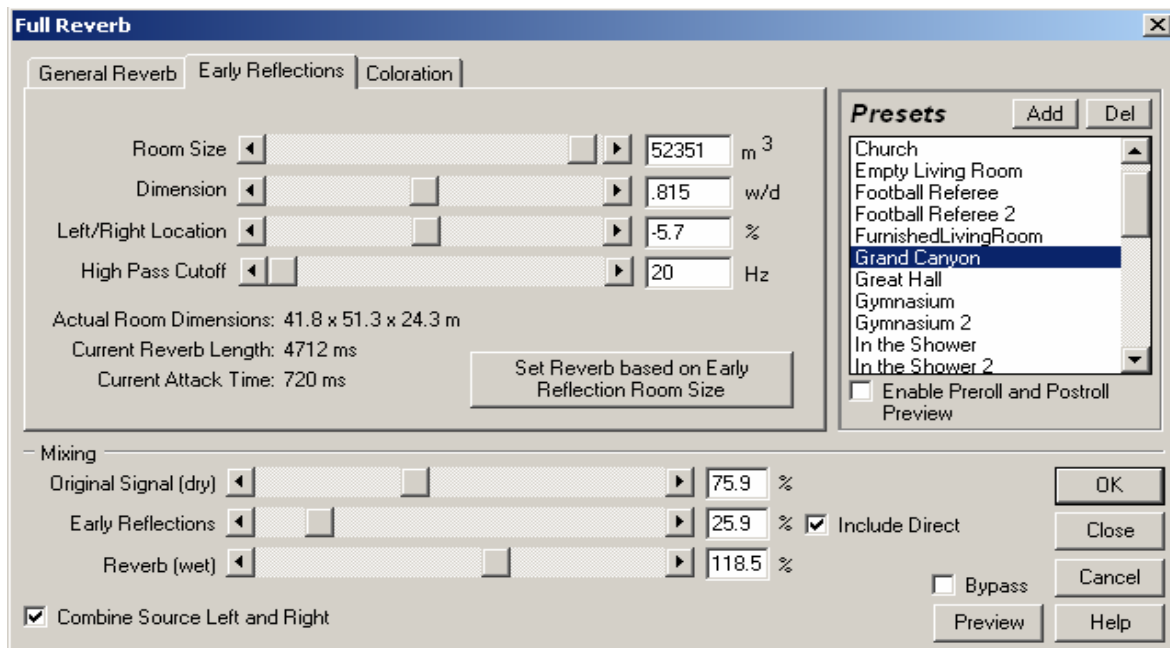
A Full Reverb effekt akusztikus terek szimulációjára használatos. Csak a konvolúción alapszik, mesterséges hanghatások nincsenek benne, akárcsak a többi Reverb effektben. Van néhány plusz benne, amit a másik három nem tud: a szimulálandó helyiség szabálytalanságait is be lehet állítani, továbbá a hangforrás nem csak a középpontból szólhat, és valóságúen modellezi a korai reflexiókat. Lehet modellezni a hangot módosító hatásokat, mint pl. a falak anyagát egy 3 sávú parametrikus equalizerrel, ahol beállíthatjuk az impulzusválasz frekvenciaelnyelési jellemzőit. Dialógusablaka így néz ki:



Jobboldalt láthatunk néhány, a programba beépített előre definiált helyiséget, illetve helyszínt. Ha ezekre rákattintunk, a jellemzőiket az ablak feltünteti. A Del gombbal törölhetünk előre definiált impulzusválaszokat. Az Add gombbal újakat hozhatunk létre, amiknek a jellemzőit nekünk kell definiálnunk.

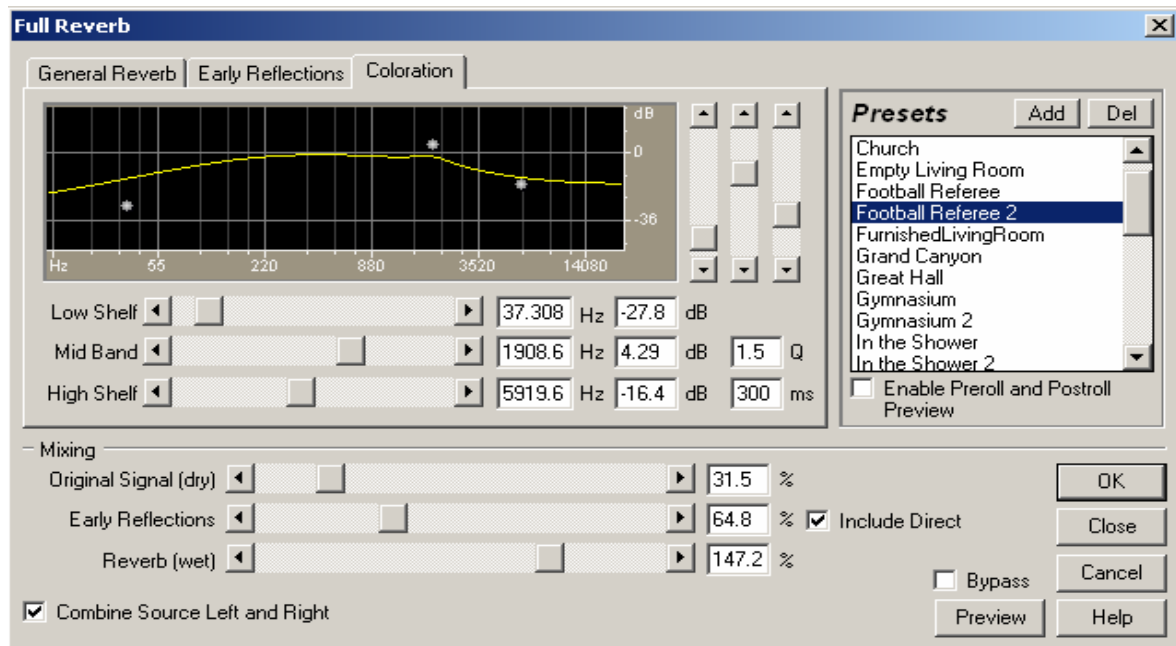
- Total Length: beállítható az idő, amely alatt az impulzusválasz 60 dB-t csökken (lecsengési idő). A határ 6000 milliszekundum.
- Attack Time: ez az az idő (milliszekundumban), amely alatt az impulzusválasz eléri a maximális amplitúdóját.
- Diffusion: a diffúziós tényező állítható. Magas értékek esetén (900 felett) eléggé lággyá teszi, "elkeni" a választ.
- Perception: ez az érték a szoba szabálytalanságait akarja modellezni. Kis értékek esetén a helyiség csaknem üres, nagy érték választása azt jelenti, hogy sok befolyásoló tényező akad (pl. bútorok), azaz sok a másodlagos, harmadlagos, stb. visszhang.

Ha átváltunk az Early Reflections ablakra, ezeket látjuk, illetve állíthatjuk be:



- Room Size: a helyszín/helyiség köbméterben kifejezett térfogata.
- Dimension: szélesség (balról jobbra) és hosszúság (előlről hátrafelé) aránya. A 0.25 és 4 közé eső arányszámú helyiségek produkálják a legszebb lecsengéseket.
- Left/Right Location: meghatározza, hány %-ban tér el a hangforrás helye a geometriai középponttól jobbra/balra. Negatív eltérés: balra, pozitív: jobbra tér el.
- High Pass Cutoff: a mély frekvenciájú hangszerek (basszusgitar, dobok) hangjában alacsonyfrekvencia-vesztést okozhatnak a visszaverődések. Hogy ezt elkerüljük, be lehet állítani azt a frekvenciát, amely fölött nem sérülhet az eredeti hang. A beállítás 80Hz-150Hz között a legjobb.

Végül létezik a Coloration párbeszédablak, amelyet a következő oldalon láthatunk. Itt egy kis képernyő szemlélteti az amplitúdómenetet a frekvencia függvényében, illetve a határfrekvenciákat is.



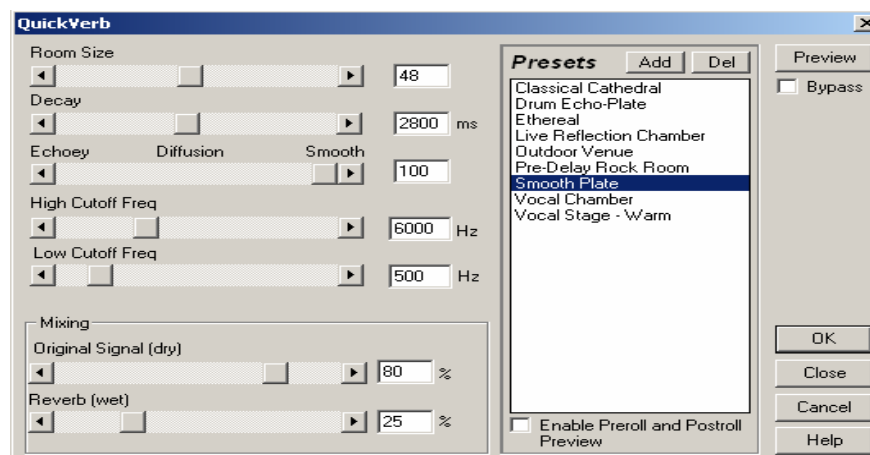
Low Shelf, Mid Band, High Shelf: itt a mély/közép/magas frekvenciák amplitúdóját állíthatjuk be (dB-ben), és a felső sávhatároknak megfelelő frekvenciákat (Hz-ben). Az ábrán az amplitúdómenet sárga vonal, a határként beállított frekvenciák fehér pontok.

A mixelő szekció (alul) a következőket tartalmazza:

- Original Signal (dry): az eredeti hangforrás arányát állítja be a készítendő szimulált felvételben. Kis értékek esetén távolinak, nagyok esetén közelebbinek hat a hangforrás.
- Early Reflections: a korai reflexiók aránya a kész felvételben. Túl nagy értékek esetén nagyon művinek hat az eredmény, erre vigyázzunk!
- Reverb (wet): a lecsengések aránya. Ha túl nagy értéket adunk neki, természetellenesnek tűnhet az eredmény, mert ezek az összetevők túl hangosak.
- Combine Source Left and Right: sztereó hangforrások esetén a feldolgozási időt felére csökkenti azzal, hogy kombinálja a jobb csatornát a balal, így csak ezt a "közös" csatornát dolgozza fel.

6.4.2. QuickVerb

Ez az effekt nem a konvolúciót, hanem néhány visszhang kombinálásán alapszik. Emiatt használata egyszerűbb, adatfeldolgozási sebessége jóval nagyobb, mint az előző Full Reverb effekté. Párbeszédablaka:

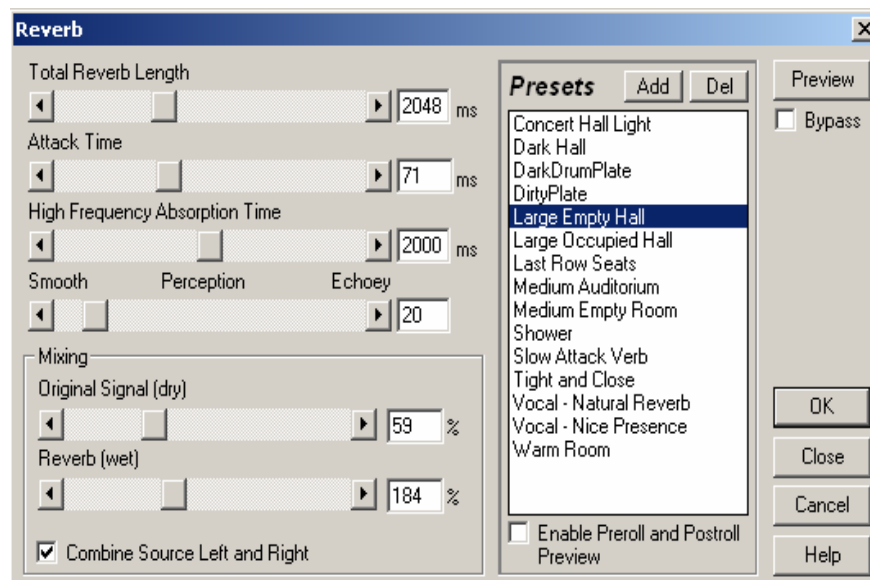


A jobb oldalon itt is találhatunk előre definiált helyiségeket. És akárcsak az előzőnél, definiálhatunk magunk is újabbakat a jellemzők megadásával. Beállítások:

- Room size: helyiség mérete. Nincs mérőszáma, csak: nagy szám=nagy helyiség, stb. Szubjektív elbírálást igényel, emiatt kevésbé pontos.
- Decay: a teljes impulzusválasz ideje, amíg a -60 dB-es szintcsökkenést eléri.
- Diffusion: a diffúzió értéket a tiszta visszhangos (alacsony) és a nagyon lágy, elkent visszhangos (magas) között állíthatjuk.
- High/Low Cutoff Frequency: a visszhang által feldolgozandó legalacsonyabb, illetve legmagasabb frekvencia beállítása.
- Mixing: az általunk készítendő hangállományban beállíthatjuk, mennyi legyen az eredeti jel (Original Signal), és a visszhang (Reverb) aránya az eredeti jelhez képest.
- Preview: a QuickVerb beállításokat itt hallgathatjuk le, mielőtt az eredeti hangállományra alkalmazzuk.

6.4.3. Reverb

Konvolúción alapuló, viszonylag egyszerűen használható effekt. Az alap Echo effektől abban különbözik, hogy egyes késleltetések közötti holtidő nem mindig azonos, így jobban megközelíti a valódi konvolúció által előidézett hatást. A Full Rverebnél régebbi, és kevesebb beállítást tartalmaz, de közkeletűebb. Ablaka:

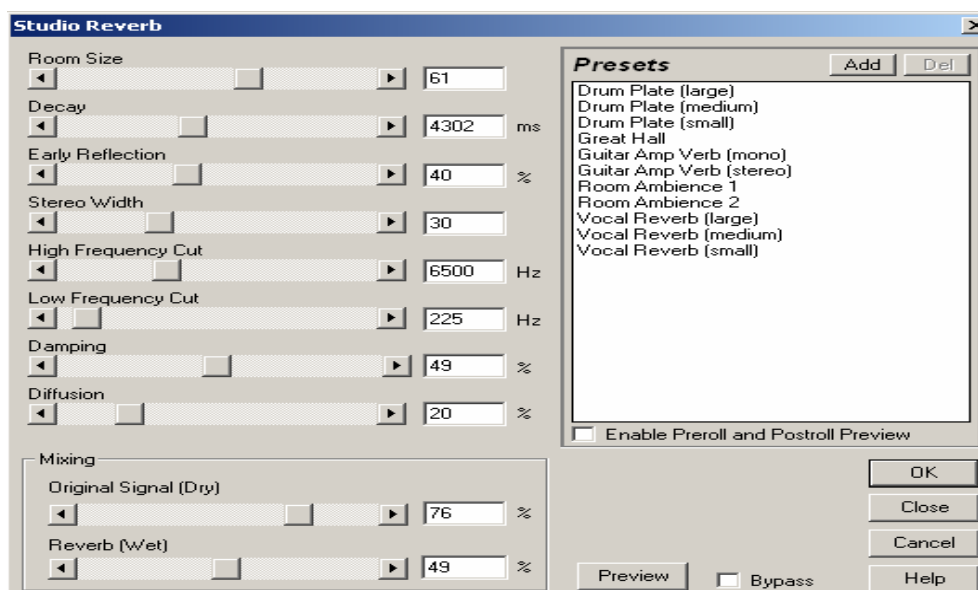


- Total Reverb Length: az impulzusválasz hossza milliszekundumban. A Full Reverbtől eltérően itt a hosszúság az impulzus kezdetétől a -96 dB-es szintcsökkenés pontjáig tart, erre figyelni kell!
- Attack Time: az az idő (milliszekundumban), amely alatt az impulzusválasz eléri a maximális amplitúdóját.
- High Frequency Absorption Time: általában az akusztikus környezetben a magasabb frekvenciák hamarabb elnyelődnek, mint az alacsonyabbak. Itt lehet állítani a magasabb frekvenciák elnyelési idejét. Alacsony elnyelési idő van erősen bebútorozott, vagy egyéb tárgyakkal telerakott helyiség, pl. raktár esetén.

- Perception: ez az érték a szoba szabálytalanságait és méreteit modellezi. Kis értékek esetén a helyiség kicsi, vagy sok másodlagos, harmadlagos, stb. visszhangkeltő tényező van benne.
- Mixing: az általunk készítendő hangállományban beállíthatjuk, mennyi legyen az eredeti jel (Original Signal), és a visszhang (Reverb) aránya az eredeti jelhez képest.
- Combine Source Left and Right: sztereó hangforrások esetén a feldolgozási időt felére csökkenti azzal, hogy kombinálja a jobb csatornát a balal, így csak ezt a "közös" csatornát dolgozza fel.
- Preview: a Reverb beállításokat itt hallgathatjuk le, mielőtt az eredeti hangállományra alkalmazzuk.

6.4.4. Studio Reverb

Ez az effekt tulajdonképpen a QuickVerb-re hasonlít, sőt azzal a legtöbb ponton megegyezik. A beállításai is meg vannak magyarázva az előbbieken, ezért csak néhány eltérő dolgot említek meg. Fő eltérés annyi, hogy az előre definiált helyiségek felvételi illetve stúdióhelyiségek. Sztereó szélességet (Stereo Width) lehet beállítani, illetve a Damping pont alatt meghatározni a lecsengések arányát az eredeti jelhez képest.



6.5. Mért impulzusválasz alkalmazása

A szimulációk során nemcsak letöltött impulzusválaszokkal próbáljuk ki az Audition programot, hanem az elméletben leírt módon mértünk, illetve rögzítettünk is ilyeneket. A méréseket a Széchenyi István Egyetem nagyméretű, kissé mozira hasonlító elrendezésű D1 előadójában végeztük. A gerjesztőjel lufi eldurranása és gázpisztoly durranása volt az előadó tanári katedráján. A mikrofonok a hátsó padsoroknál helyezkedtek el, jobb-bal elhelyezésben, ami sztereó felvételt eredményezett. A rögzítést a szakdolgozatomban már említett Cool Edit Pro programmal végeztük, ami az Adobe Audition 1.5 közvetlen elődje.

A lufi gerjesztőimpulzussal 4, a pisztollyal 1 kísérletet tettünk. A mikrofonok nagy érzékenysége miatt ezen kísérletek közül a negyedik lufidurranásos gerjesztés eredményezett

megfelelő impulzusválaszt, így a továbbiakban ezt vizsgáltam (a többi kísérlet túl magas amplitúdókat eredményezett, azaz a mikrofonok túlgerjedtek).

Ez az impulzusválasz: lufi4.wav. Az előbbiekből adódóan sztereó felvétel, és szerkesztésre is szorul: a gerjesztőimpulzus előtt nemcsak a terjedési időinformáció van, hanem egy felesleges szakasz is. Ez onnan adódik, hogy a gerjesztőimpulzust pontosan a felvétel kezdetének pillanatában keltettük, hanem néhány másodperccel később sikerült. Az Additionnal ez könnyen orvosolható, ehhez a hangforrások-mikrofonok távolságát kell ismerni, ami 21 méter volt. A terjedési idő így 340 m/s sebességgel számolva (közepes páratartalom, 20 °C hőmérséklet mellett) 0,06 s-ra jött ki. Az időtengelyt decimális egységekre választva (View menü/Display Time Format) pontosan a kívánt helytől kezdve jelölhető ki az impulzusválasz. De még jobban használható ehhez az időkijelző (alul).

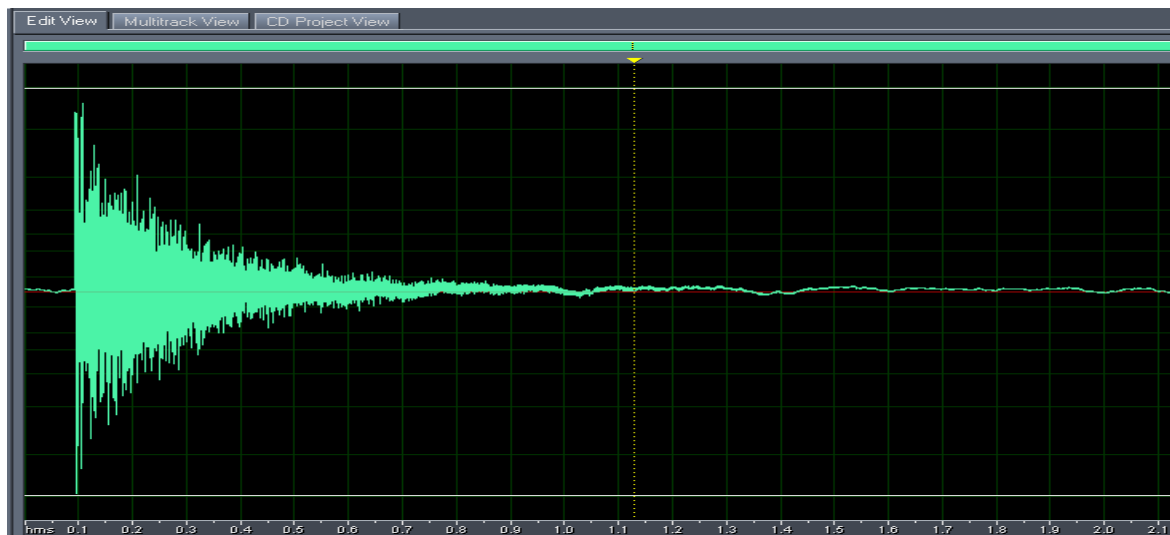
Ezt egér jobb gombbal előhívott menüben a Copy paranccsal vágóasztalra tesszük. Ezután File menü/New paranccsal új felvételi ablakot nyitunk a szerkesztőterületen, és ide illesztjük egér job gombbal előhívott menüben a Paste paranccsal a vágóasztalra helyezett felvétel-darabot. Végül ezt az átszerkesztett impulzusválaszt lufi4m.wav-ként mentjük el a File/Save as... paranccsal. A kívánt fájl-kiterjesztést, jelen esetben Windows PCM (*.wav)-ot nekünk kell beállítani mentéskor!

A feladatban mono impulzusválaszok kellenek, így külön dolgozunk a jobb és bal csatornával. Vegyük figyelembe, hogy az Audition felülre teszi a bal, alulra a jobb csatorna időfüggvényét! Az előbbi műveletsort végigcsinálva - és a kijelölést ebben az esetben csak az egyik csatornára alkalmazva - kaphatjuk a jobb, illetve bal csatornás impulzusválaszt:

lufi4m-jobb.wav

lufi4m-bal.wav

A szemléltetés kedvéért a lufi4m-jobb.wav időfüggvénye:

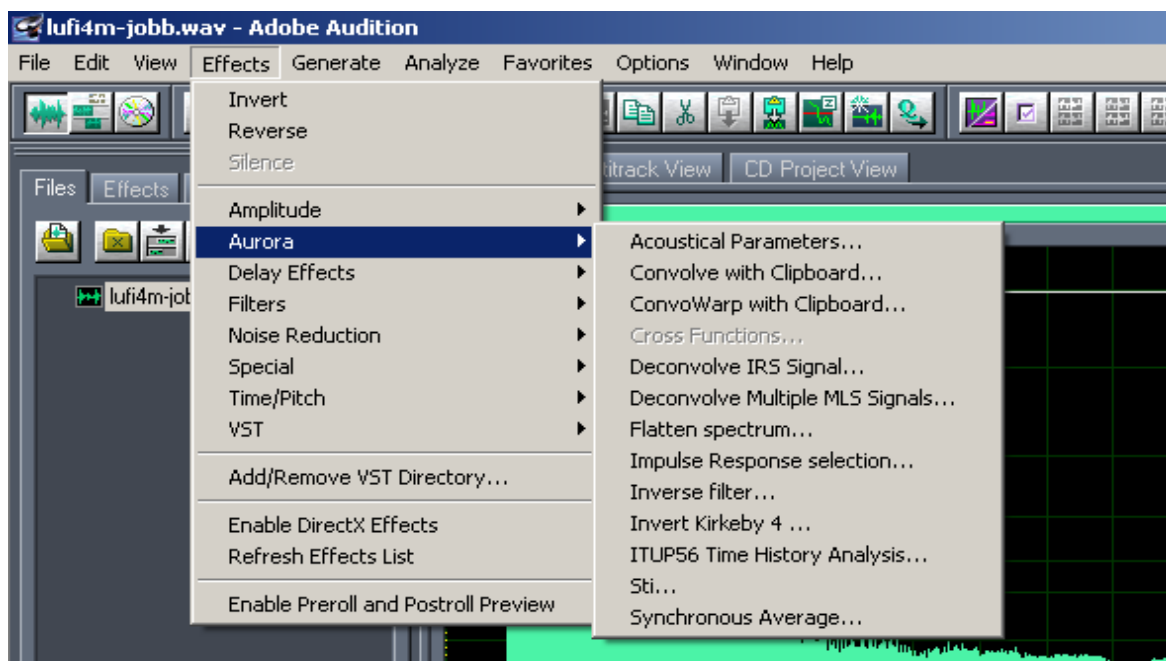


Az ilyen módon feldolgozott impulzusválasz alkalmas a további vizsgálatokra, konvolúcióra és egyéb felhasználásra.

6.5. Az Aurora segédprogram-csomag

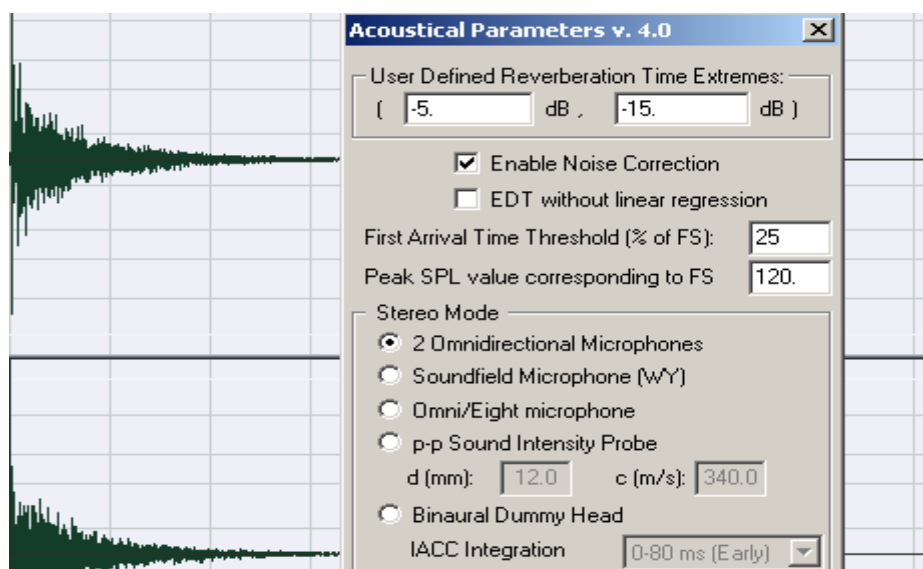
Az Aurora csomag tulajdonképpen nem egyéb, mint egy Adobe Auditionhoz kapcsolódó segédprogram (plug-in) gyűjtemény. Segítségével már meglévő impulzusválaszokon végezhetők mérések, illetve kisebb szerkesztések. Angelo Farina, egy olasz akusztikai tudományokkal foglalkozó professzor hozta létre sok egyéb között, és a párizsi egyetem egyik

szerverén tették közzé 2007 őszén, rövid időre ingyenesen hozzáférhető változatban. Ez a változat 30 napig "él". Hátránya sajnos, hogy kísérleti jellegű programcsomag, így egyes funkciók nem működnek rendesen. Működéséhez Windows XP vagy későbbi operációs rendszert igényel. A plug-in csomag letöltése és a telepítő futtatása után az Audition mappájába telepíti magát, és az Audition kezelőfelületén az *Effects menüben* jelenik meg, külön menüpontot alkotva: *Aurora*. Ebből az almenüből több menüpont nyílik:

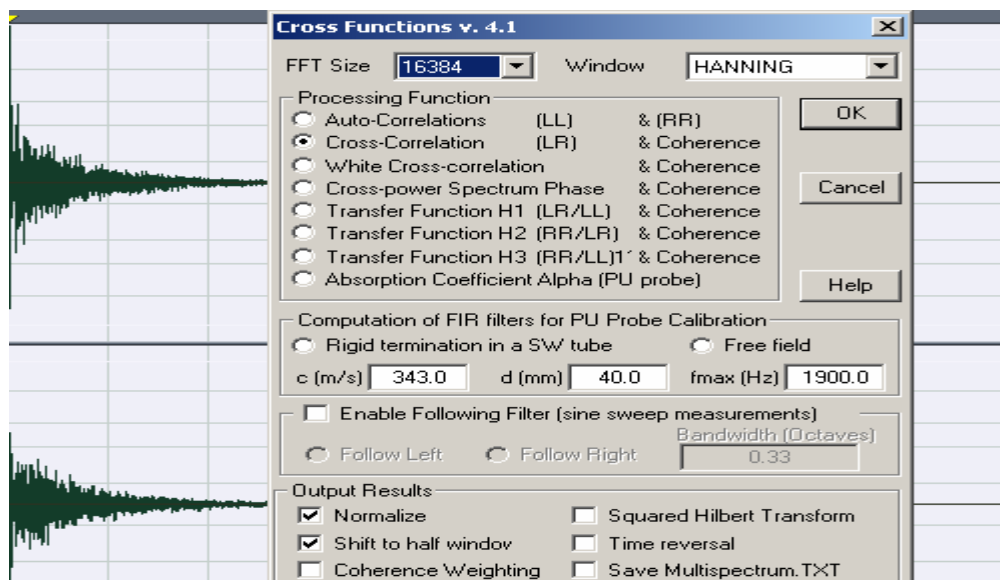


A menüpontok rendre a következők:

- **Acoustical Parameters:** beállítható az impulzusválasz néhány akusztikai paramétere. Felül az impulzusválasz az általunk megadott határok közé szorítható (dB-ben). Utána engedélyezhetjük a zajkorrekciót, majd meghatározhatjuk a korai reflexiók küszöbszintjét az alapjel %-ában. Sztereó módban a felvevő mikrofónok elhelyezkedését módosíthatjuk, illetve egy pont-pont között mért hangintenzitási próbát végezhetünk (pontok közötti távolság és a helyi hangsebesség beállításával).

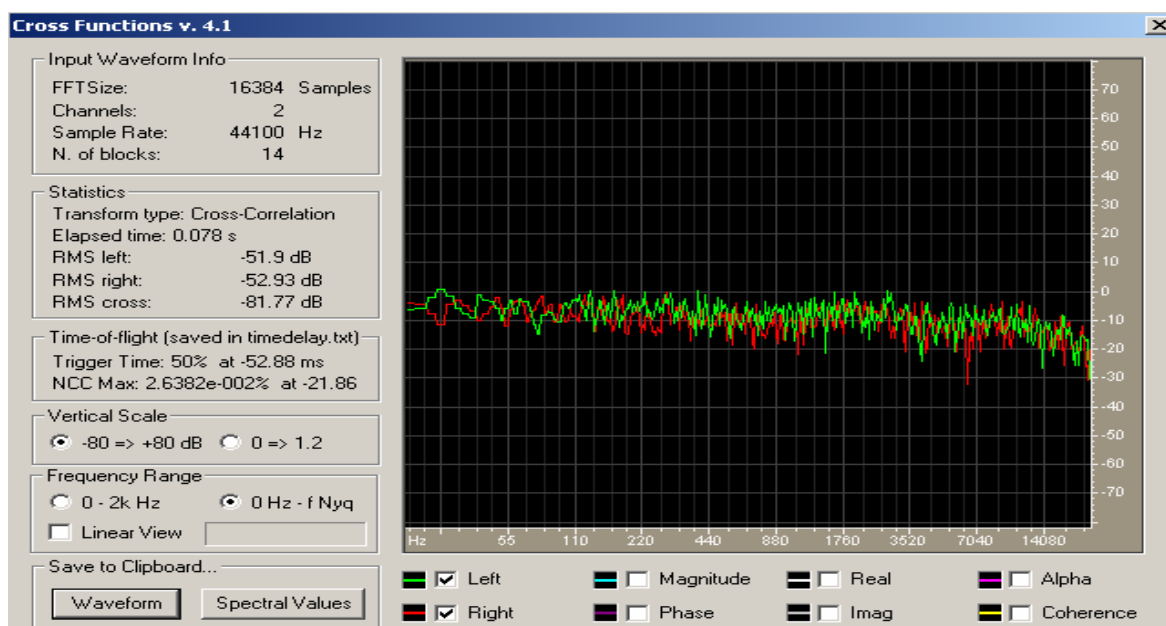


- **Convolve/Convowarp with Clipboard:** az általunk előzetesen kijelölt és Copy paranccsal vágóasztalra helyezett hangmintát (vagy hangminta darabot, a kijelöléstől függően) összekonvolvál azzal az impulzusválasszal, amelyen állva a parancsot kiadtuk. Sajnos ez csak elviekben működik ilyen jól, itt általában csak kisméretű fájlokat fogad el, és azoknál is gyakran hibaüzenetet ír ki, miszerint a vágóasztalon lévő hangminta nem megfelelő.
- **Cross Functions:** itt a csatornák közötti kapcsolatokat határozhatjuk meg.

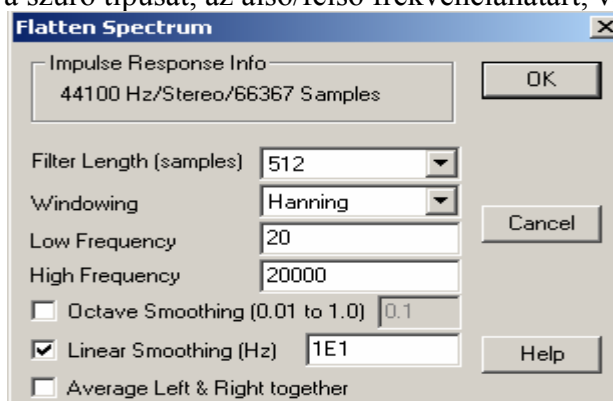


Felül az FFT méret állítható be mintákban, illetve a súlyozó szűrő típusa (Blackman, Hanning és még néhány típus közül lehet válogatni. Utána a feldolgozásnál használt korrelációk és átviteli függvények határozhatók meg. Alul a kimeneti mintát lehet normalizálni, súlyozni, Hilbert-transzformálni.

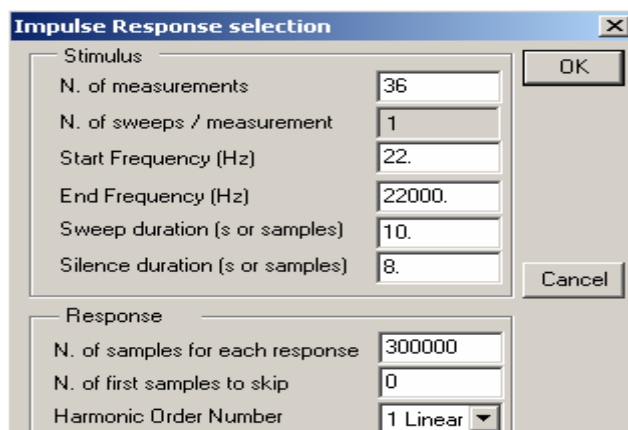
A Hilbert-transzformáció az alábbi érdekes ablakot adja (az előbbi ábrán megfigyelhető kétcsatornás impulzusválasz esetében):



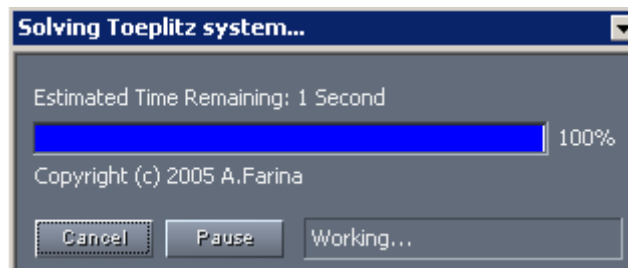
- Deconvolve IRS Signal/Deconvolve Multiple MLS Signal: ezekkel az alkalmazásokkal hangfelvételeket szabadíthatunk meg a konvolúció okozta hatástól, előbbi esetben egycsatornás felvételt, utóbbiban többcsatornásat. Inkább akkor működik igazán jól, ha az általunk konvolvált hangfelvételek konvolúciós műveletének visszavonásaként használjuk, ezt tudja maradéktalanul megoldani. Eredetiben konvolvált jelekről nehezen válaszja le az impulzusválasz összetevőit, erősen terheli a processzort.
- Flatten Spectrum: itt spektrumsimítás végezhető el. Meg kell adni a simító szűrő minták szerinti hosszát, a szűrő típusát, az alsó/felső frekvenciahatárt, valamint a simítás jellegét:



- Impulse Response Selection: ez nagyon érdekes szolgáltatás, vagy legalábbis az lenne, ha nem adna majdnem minden esetben hibaüzenetet. Lényege hogy a megadott impulzusválaszt végigvizsgálja az általunk megadott alkalommal sweepgenerátorral, és ennyi impulzusválaszt rajzol fel (csekély eltérésekkel), amik közül ki lehet egyet választani:



- Inverse Filter: inverz szűrő, amelynek hosszát (mintában) mi adhatjuk meg. Ez elvileg működhetne is, de a gyakorlatban ennyi történik, hogy megjelenít egy kis ablakot állapotával:



Ezután pedig nem történik semmi látszólag, holott egyszer fél óráig hagytam dolgozni. A processzort viszont eléggé megterheli, 2,3 GHz-es processzorra más alkalmazás nagyon lassan futott. Ezt a funkciót, legalábbis az ingyenes csomagban, nem ajánlom.

- STI & Octave Band Analysis: érdekes funkció, oktávonként elemzi és mutatja meg a jelszintet és a zajszintet az impulzusválaszban:

STI & Octave Band Analysis

Calibration (Octave Analysis)
☒ Full Scale ☐ Leq
 Calibration value (dB): 120.00
 Compute Octave Band Spectrum

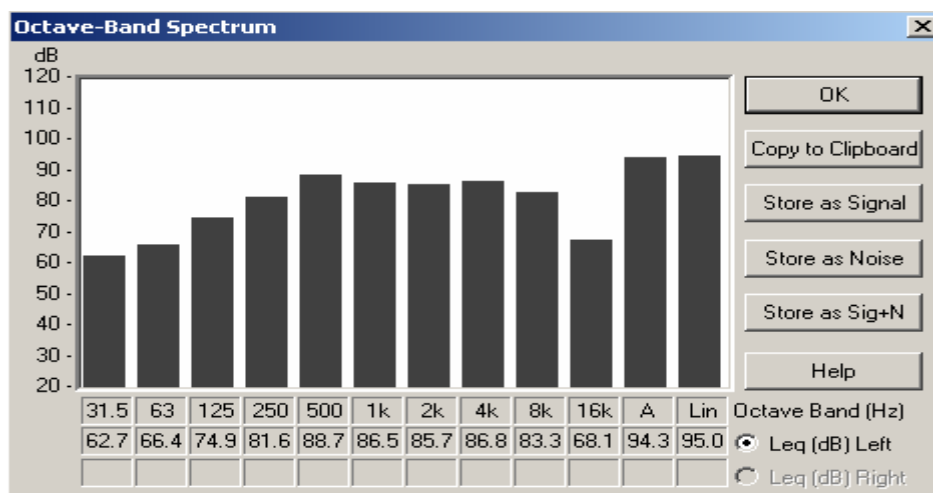
Load SPL Values from File... Save SPL Values to File...

Hz	BackGnd Noise Level	Signal Level	Signal + Noise Level
125	48.0	70.9	70.9 Edit
250	45.0	70.9	70.9 Edit
500	42.0	67.2	67.2 Edit
1k	39.0	61.2	61.2 Edit
2k	36.0	55.2	55.3 Edit
4k	33.0	49.2	49.3 Edit
8k	30.0	43.2	43.4 Edit

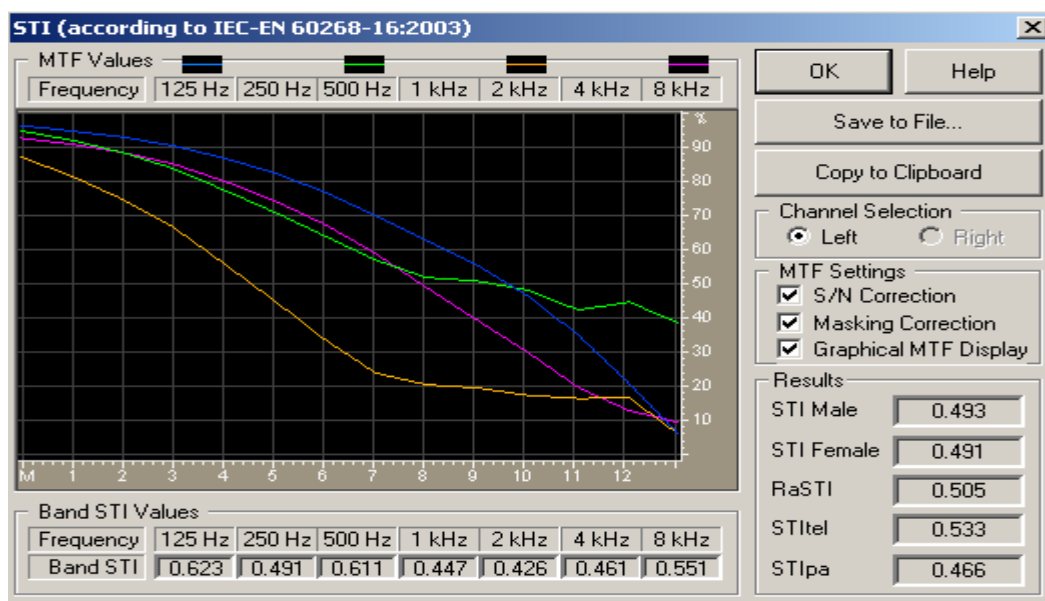
Left/Mono Right Left/Mono Right Left/Mono Right

Impulse Response Analysis
 First Arrival Threshold (% of Full Scale): 20
 Compute STI

Jelen esetben mono impulzusválaszon végeztem a vizsgálatot, az általunk mért lufidurranásos kísérletből eredőn (lufi4m-jobb.wav). Kétsatornás esetben természetesen értékek jelennek meg a jel- és zajszintek jobb oszlopában is. A harmadik csoport nem elérhető az ingyenes csomagban. Az értékeket fájlba menthetjük, illetve onnan hívhatjuk elő. A Compute Octave Band Spectrum gomb végrehajtja az analízist, és ezt az ablakot jeleníti meg, ahol az eredmény grafikon jellemben mutatja:



A Compute STI gomb hatására rövid feldolgozási idő után egy másik ablak jelenik meg, amely az egyes frekvenciaösszetevők amplitúdóarányát mutatja:



6.6. Rövid utószó az Auditionhoz

Az előbbi feladatokban végigpróbáltuk az Auditionnal történő konvolúciós zengetés megvalósítási lehetőségeit, és a beépített funkciókat, és a segédprogram-csomagokkal beépülő funkciót. Egy megállapítás azonban még ide kívánczik. A konvolúciós műveletek nem minden esetben sikerültek, néhány esetben az általam impulzusválaszként mentendő .wav állományt az Audition nem fogadta el az impulzusválaszok közé felvétel műveletében. Nem sikerült egyértelműen megállapítani, mi okozza ezt. A probléma megoldására külföldi fórumokon is kerestem választ, de kielégítő magyarázatot nem kaptam, ez tehát függőben maradó kérdés. Egyéni feltételezés szerint a .wav állomány fejlécében a formátumleíró rész adatainak kisebb hibája vagy hiánya. A program valószínűleg nehezen tolerálja a fejléc adatainak kisebb hibáit, hasonlóan a sokak által ismert Windows Media Playerhez. A kérdést a kísérletezés oldhatja meg, tehát mindig az adott .wav állománytól függ, elfogadja-e az Audition impulzusválaszként (az általam vizsgált állományok nagy részét elfogadta, csak néhánynál nem volt erre lehetőség).

7. Más, konvolúción alapuló programok

Most néhány másik program rövid elemzése következik, amelyeknek elve az elméletben tárgyalt konvolúción alapszik, de az Adobe Auditiontól eltérően kizárólag konvolúciós zengetésre lettek kifejlesztve.

7.1. AudioEase Altiverb 5.

Az egyik valós idejű, konvolúciót felhasználó plug-in (segédprogram), amely egyben a legnépszerűbb is az amatőr/profi felhasználók körében. Eredetileg Macintosh-ra fejlesztették ki, de most már PC-re is kapható ez a konvolúciós zengető, RTAS és VST formátumokban. A gyártó állítása szerint a megszólaló hang minősége 100 százalékosan ugyanolyan lesz mindkét platformon.

Az Altiverb nem olcsó, 600 dollárba került 2006 tavaszán, de ennyi pénzért gyakorlatilag megkapjuk a világ legjobb hangversenytermeinek akusztikáját (ezek úgynevezett

impulzusválaszait a helyszínen mintavételezték), és ezeken kívül még egészen extrém környezeteket is felvettek, például egy Boeing 747-es belső akusztikáját. A beépített Impulse Response Pre-Processor szoftver segítségével saját impulzusválaszokat is előállíthatunk, bár ez a lehetőség egyelőre még csak Macintosh platformon elérhető.

Az Altiverb az impulzusválaszokra a .sit fájlformátumot használja. Ez az Apple Macintosh gépek saját tömörítési formája, melyet a StuffIT programmal lehet kicsomagolni. A sztereó impulzusválasz csomag az Altiverb esetében tartalmaz egy képet (.jpg), és két másik fájlt, C, L, illetve R kiterjesztéssel, és ha valamelyikből több van, számmal. Ezek a teremimpulzusválasz felvételek a mikrofonok felvett jelei, irányinformációkkal a mikrofonok helyére vonatkozóan az adott helyiségben. A kép pedig az adott helyiség képe, ahol a felvétel készült. Például a 001 small dense hall.sit állomány kicsomagolása után a következőket kapjuk:

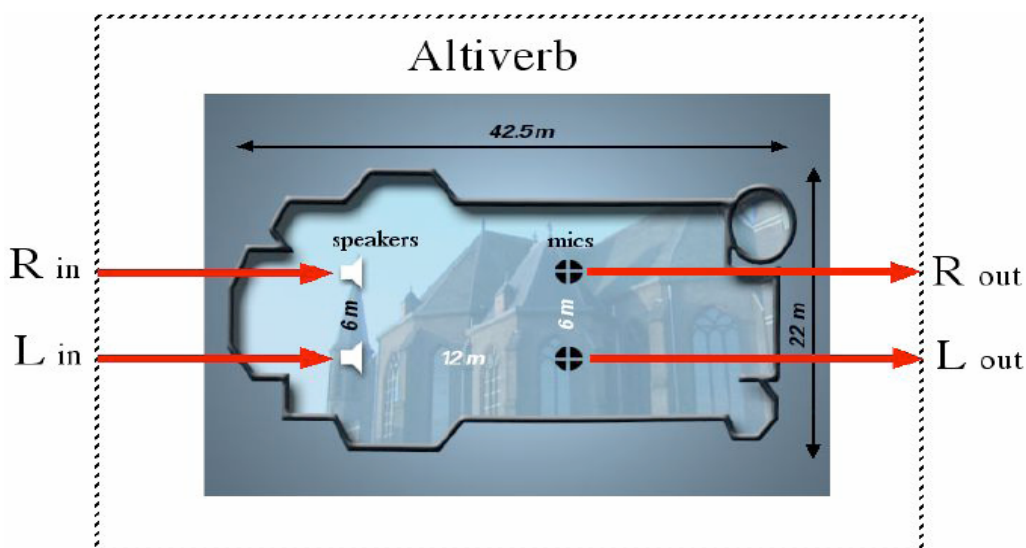
001 small dense hall.c1

001 small dense hall.c2

001 small dense hall.jpg

Mono impulzusválasz esetén csak egy C, L, illetve R kiterjesztésű állomány van és a .jpg kép. (C=Center=közép, L=Left=bal, R=Right=jobb, a mikrofonpozícióra utal.) Négy mikrofonos IR felvétel esetén négy állományt találhatunk a csomagban. Az Altiverb tud dolgozni 5.0 illetve 5.1 felvételekkel is. A csomagok mikrofon karakterisztikák szerint vannak besorolva egy adott helyszínhez tartozó mappán belül. Mindezen állományokhoz esetleg egy mozgófilm is társul .mov kiterjesztéssel.

Miért is van szükség ezekre az állományokra? Az Altiverb felfogható úgy, mint egy visszhangos terem. A hangsugárzókon beadjuk a hanganyagot, a tetszőlegesen elhelyezett mikrofonokon át pedig megkapjuk a terem impulzusválasza által módosított hangokat.



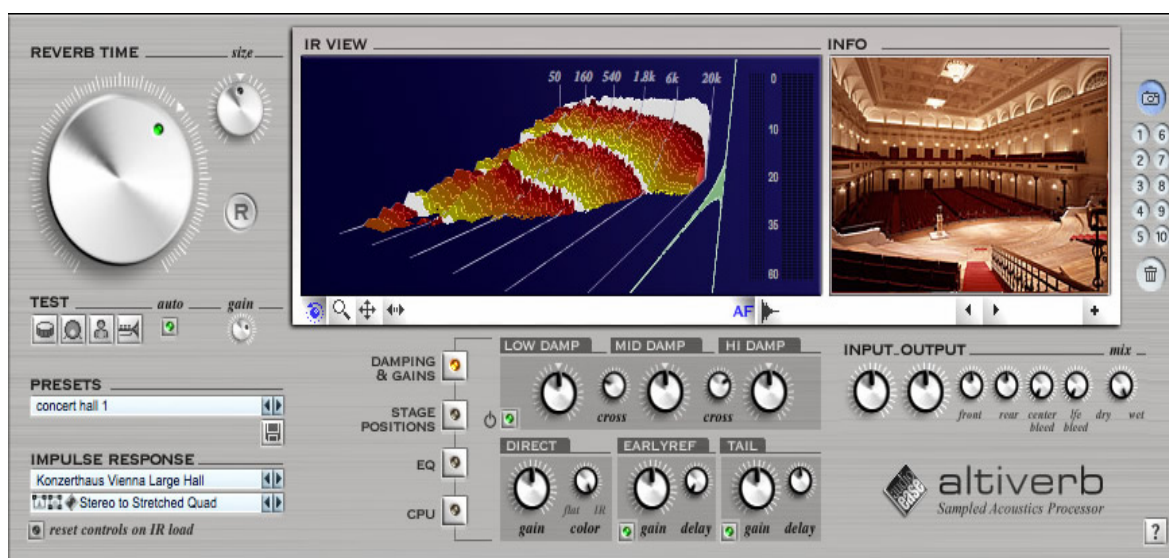
Érdekessége az Altiverbnek, hogy nemcsak hangtér formájában érzékelteti a virtuális valóságot, hanem képek formájában is. Ez annak a helyiségnek a képe, ahol az adott impulzusválaszt felvették. A helyszínről sok esetben több képet is ad. Némely felvételekhez mozgófilm is van, egyfajta körüljárást biztosítva a felvétel helyszínén, még jobban erősítve ezzel a virtuális valóság összképét. A képeket a kezelőfelületen jeleníti meg. Ugyancsak itt látható az impulzusválasz 3 dimenziós diagramja, amely idő-frekvencia-amplitúdó ábrázolás.

Hátránya viszont az Altiverbnek, hogy erősen számításigényes, így gyengébb CPU-t leterhelhet. A számításigényességet az okozza, hogy magasabb mintavételezési frekvenciákat használ a belső számítási folyamataiban, mint az általában alkalmazottak: 88,2 kHz a legalacsonyabb. A többcsatornás (pl. 5.1) impulzusválaszokkal való munka is okozhat terhelést, de mivel általában itt is a mono illetve sztereó impulzusválaszok gyakoriak, ez ritkán okoz problémát.

A programhoz tartozik sok előre definiált helyszín, annak minden akusztikai szempontból lényeges jellemzőjével együtt. Ebben hasonlít az Audition beépített effektjeire. Hasonlóság az is, hogy az előre definiált helyszínekre más értékeket is megadhatunk, elmentve mint saját beállításokat. Hozott impulzusválasz-állományokkal is dolgozhatunk, amit például az internetről több oldalról le lehet tölteni ingyenesen, egy részük pedig megvásárolható.

Az Altiverb program telepítése után egy már meglévő, általunk választott hangszerkesztő programba "ágyazódik be", itt hívható elő a képernyője, amikor egy adott hangmintával dolgozunk. A paraméterek állítása a program kezelőfelületén forgatógombokkal állítható be, egyszerűen kattintva és egerrel forgatva ezeket. Másik megoldás: ráklikkelve a gombra a megnyíló ablakba beírható a paraméter értéke. A kezelőfelület ezenkívül tartalmazza a fájlkezelésre és a lejátszásra vonatkozó paneleket is.

Mindezek láthatók a jellegzetes Altiverb-képernyőn, a következő oldalon:



Az előre definiált helyszínek panelja a bal alsó sarokban található:



Itt választhatjuk ki az előre-hátra nyilakkal az akusztikus környezetet, valamint a mikrofonok beállítási módjait. Utóbbinál a kis ablakban két négyzet alakú ábra van: az első a bemenetek (hangsugárzók) számát, a második a kimenetek (mikrofonok) számát ábrázolja. Újabb impulzusválaszokat is itt rakhatunk a menübe. Az AudioEase rendszeresen tesz fel újabb

impulzusválaszokat a honlapjára: www.audioease.com/IR. Innen letöltve ezeket, rájuk klikkelve automatikusan installálódnak a már meglévők közé.

A felette levő Presets menüben tárolhatjuk el és hívhatjuk meg a magunk által definiált akusztikus környezetet. Itt végezhetők el az ezekkel való fájlműveletek, mint megnyitás, mentés, mentés más néven, törlés, átnevezés.



Reverb time: ezen a panelon állítható be az impulzusválasz lecsengési ideje.

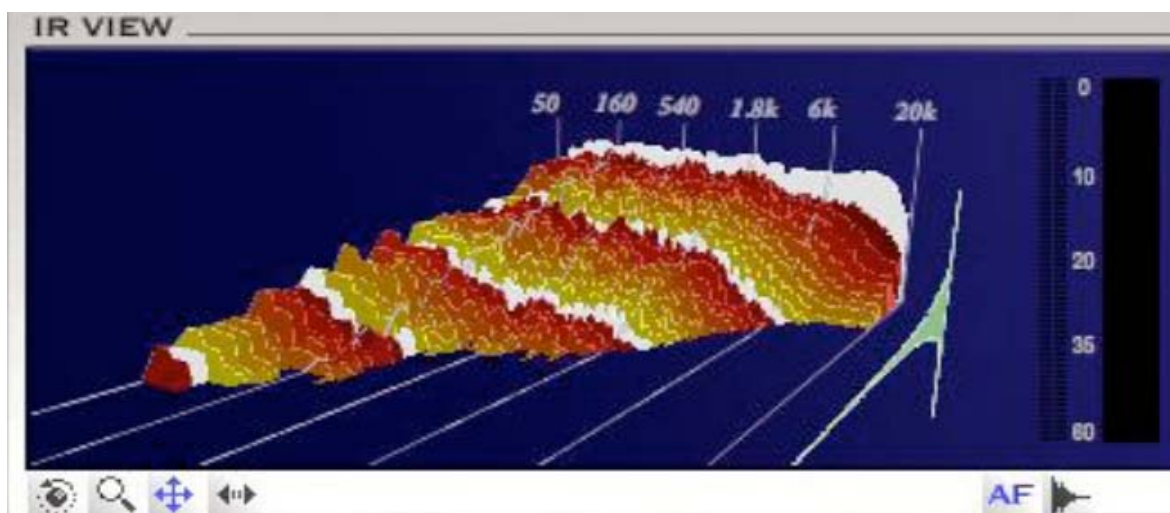


A Size gomb a szimulálandó helyiség méretének meghatározására való. Szubjektív megítélés alapján működik, nem konkrét adatokkal.

R gomb: ezt benyomva a program teljes hosszúságú impulzusválaszokkal dolgozik, nem vág le a lecsengési részből.

Test: itt lehet lejátszani a tesztelő hangokat, amiket az Altiverb bemenetére adhatunk. Ezeken lehet felmérni az előre definiált, illetve az általunk beállított impulzusválaszok hatását. Az Auto gomb hatására minden impulzusválasz-módosítás után lejátszsa a vele összekonvolvált teszthangot.

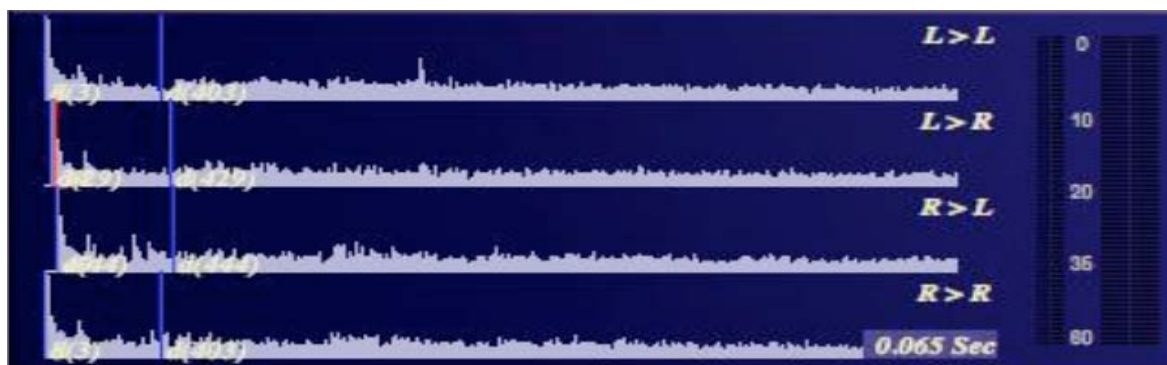
A kezelőfelületen felül található az adott impulzusválasz idő-frekvencia-amplitúdó diagramja, melyet alakja után Vízesés-diagramnak is neveznek:



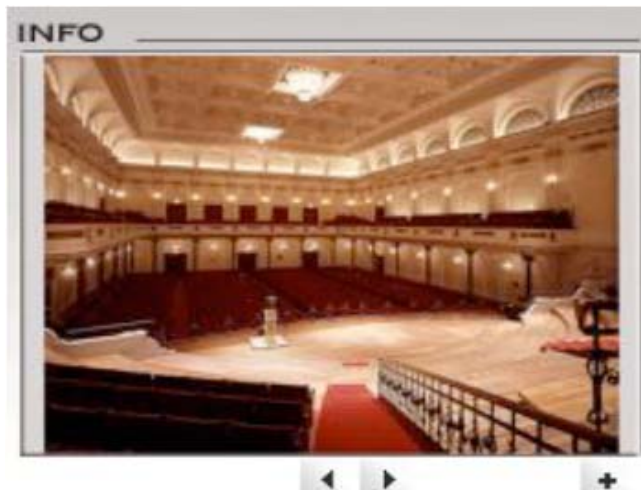
Oldal van a decibel-skála. A baloldali alsó ikonokkal forgathatjuk, nagyíthatjuk/kicsinyíthetjük, mozgathatjuk a diagramot. A jobboldalt lévő AF (auto fókusz) automatikusan olyan nézetbe rakja a diagramot, amely az adott helyzetben legkönnyebben kiértékelhető.

A  és  gombokkal válthatunk a vízesés-diagram és egy többcsatornás nézet között, utóbbin a hangsugárzók és mikrofonok közötti terjedési utakon mért egyes impulzusválaszokat tünteti fel. Például az R>L a bal mikrofon felvétele, amikor a jobb hangsugárzó bocsátotta ki az eredeti jelet. Hangsugárzó szintek a bal, mikrofon által vett szintek a jobb decibel-skálán olvashatók le.

A többcsatornás diagram:

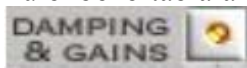


A kis képernyő a munkaterület jobb felső részén képi információkat nyújt az általunk szimulálni kívánt akusztikus térről:



Az előre-hátra nyilakkal előhívhatjuk azt a plusz információt, ami esetleg az impulzusválaszokhoz lett adva. Ha feltételezzük, hogy az Altiverbnél megszokott pluszok mind hozzá vannak adva az általunk éppen vizsgált impulzusválaszhoz, akkor itt nézhetünk egy rövid bemutató filmet a helyszínről, láthatjuk az aktuális mikrofon-elrendezést (Recording Layout), és adatokat is megtekinthetünk (Info Screen). Sőt a Statistics pont alatt a hangfelvétel helyéről, annak történetéről, és magáról a felvételtől is vannak információk.

A képernyő és a grafikon alatti területen négy kapcsolóval négy különböző tábla állítható be.

Az első, az erősítések és hangtompítások kezelésére használt a  gombbal hívható elő:



Itt a nagy forgatógombokkal adhatunk értéket az alacsony, közép- és magas frekvenciasávoknak (balról jobbra). Közöttük a kisebb gombok az alacsony-közép, illetve közép-magas frekvenciasávok határainak beállítására valók. Javasolt először a sávhatárokat beállítani.

Alatta a direkthang, a korai reflexiók és a lecsengések erősítése, illetve időtartama határozható meg:



A második előhívható panel a Stage Positions, amellyel a hangsugárzók helye adható meg. Ezeket tetszés szerint helyezhetjük el a "színpadon":



A harmadik panel nem más, mint egy equalizer-szintszabályozó. Ez csak a már impulzusválasszal összekonvolvált hangmintán alkalmazható:



A negyedik panel a feldolgozásra vonatkozó információk megadására alkalmas:



A CPU és alatta a szintmérő a processzor leterheltségét jelzi. Efficient hi latency mode: ezt bejelölve a legkevesebb számításigényű, mégis ezen belül leghatékonyabbnak tűnő kompromisszumos feldolgozást alkalmazza. Így kb. 1 másodperc alatt tudja feldolgozni a teljes impulzusválaszt. A Control Adjustments bejelölés a feldolgozás alatti/utáni meghallgatást teszi lehetővé.

Tail Cut: ez annyiban könnyíti a processzor dolgát, hogy a direkt hangtól (gerjesztéstől) számított 120 dB-es szintcsökkenés után levágja az impulzusválasz hátramaradó részét, tehát megrövidíti azt.

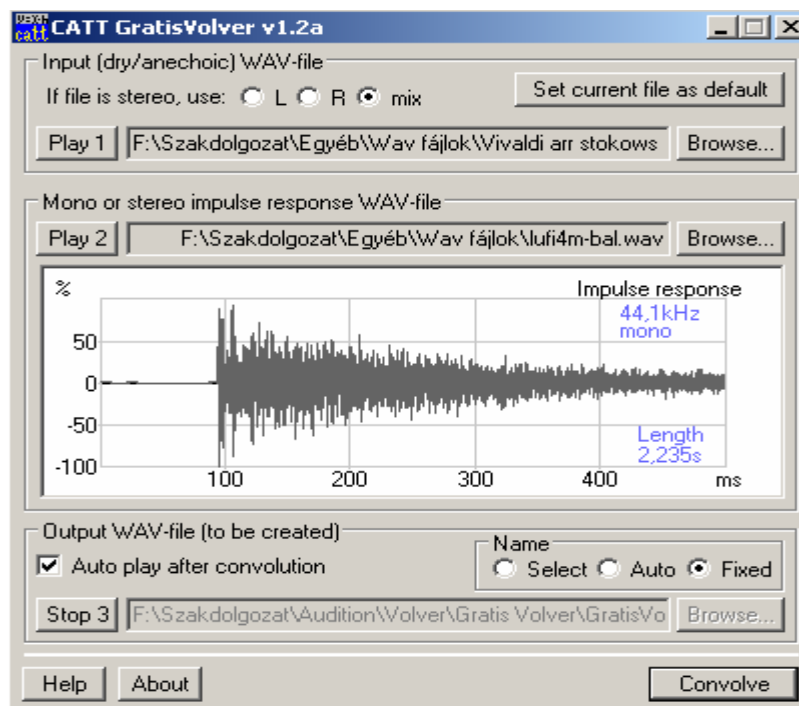
Végezetül a jobb alsó sarokban található a bemeneti és kimeneti szintszabályzó:



Az ábra egy hatkimenetű Altiverb-felvételnél néz ki így, egy vagy két kimenetűnél (1 illetve 2 mikrofonnal) csak a baloldali két nagy forgatógomb: a bemeneti és kimeneti erősítő és a "Mix" gomb látható itt. Továbbiakkal a Front (bal-jobb első), Rear (bal-jobb surround), Center Bleed (középső csatorna), és a LFE Bleed (mélysugárzó által keltett zengetett hang csatorna) mikrofonok kimeneti erősítése állítható. A Dry/Wet Mix a kimeneti hangmintában a eredeti bemenet és a konvolvált hangállomány arányát állítja be.

7.2. CATT GratisVolver program

A GratisVolver egy egyszerű, kicsi, nem túl hardverigényes program, amely a CATT szoftvercsomag ingyenesen letölthető része. Hátránya, hogy erősen korlátozott a hangminta mérete, amelyen a konvolúciót végre akarjuk hajtani, néhány Mbyte lehet a méret. A használandó impulzusválasz hossza is erősen korlátozott, hosszú IR fájlokat em jelenít meg teljesen, és csak a megjelenített hosszúsággal dolgozik. Nem lehet elvégezni azokat a beállításokat, amiket az Audition használatakor. Előnye viszont, hogy ezen a méretkorlátozáson belül megbízhatóan dolgozik, és kezelése nagyon egyszerű. Mono és sztereó hangmintákkal, illetve impulzusválaszokkal is működik, .wav állományokkal. Kezelőfelülete egyszerűsége és elrendezése miatt vonzó:



Felül megnyithatjuk a módosítani kívánt eredeti hangmintát, és ha az sztereó, akkor választhatunk, hogy a jobb, bal vagy a két csatorna keverését használja (a program ugyanis alapvetően mono bemenetre készült). Ezután megnyithatjuk az impulzusválaszt, amely lehetőleg .wav kiterjesztésű. Ennek időfüggvénye megjelenik a kis ablakban. Hosszú impulzusválasznak csak a program által megadott időtartományba beleférfő részét jeleníti meg (és ezzel a résszel dolgozik tovább)! Alul adhatjuk meg a kimeneti állomány nevét, és azt, hogy a konvolúció végrehajtása után az eredményt automatikusan lejátssza-e. A konvolúció maga a Convolve gombbal hajtható végre.

7.3. Waves segédprogramok

A Waves a világ egyik vezető hangtechnikai cége. Oldalukon (waves.com) sok más között konvolúciós plugin-eket (segédprogramokat) jelentettek meg. Ezek sajnos ingyenesen nem hozzáférhetők, mint ahogy a cég többi programja illetve programcsomagja sem. Ennek ellenére érdemes megemlíteni két ilyen segédprogramot, már csak amiatt is, hogy a kezelőfelületüket szemügyre vehessük, ezeket a cég ugyanis közzétette.

Egyik az IR segédprogram, tulajdonképpen IR-család, 3 nagyon hasonló plug-in:



Az IR-1 kezelőfelülete (a másik kettőé alig tér el):



A segédprogram több mint 100 impulzusválaszt tartalmaz, továbbá saját állományok felvételének lehetőségét. 24 bit legnagyobb mélységig, 96 kHz maximális mintavételi frekvenciáig működik. PC és Mac rendszerekkel egyaránt kompatibilis. Az IR360 abban tér el, hogy támogatja a Surround hangzás megvalósítását. Az IR-L pedig a kevesebb beállítási lehetőséget tartalmazó ablakával könnyebb és hatékonyabb munkát ígér.

Másik megemlíthető segédprogram az R360 Surround Reverb. Hardverigényei és feldolgozási határai ugyanazok, mint az IR programoknak. Itt viszont az impulzusválaszt többféleképpen módosíthatjuk, jellemzően a hangforások irányának és elhelyezkedésének megadásával és a mikrofon iránykarakterisztikák meghatározásával. Kezelőfelületén láthatjuk ezeket a beállítási lehetőségeket:



Létezik még a Renaissance Reverb, amit klasszikus zenéhez optimalizáltak, illetve a TrueVerb, aminél a lehető legtermészetesebb hangzás létrehozása a cél az impulzusválaszok és a korai reflexió szimulátor kombinálásával.

7.4. Egyéb konvolúciós programok

Végezetül, a kínálat érzékeltetése végett felsorolnék néhány konvolúciós programot, illetve segédprogramot, a teljesség igénye nélkül. Internetes hivatkozások szerint összesen kb. 110 van. Közös a felsoroltakban, hogy ingyenes hozzáférést nem tesznek lehetővé, áruk viszont elég eltérő lehet.

Néhány az ismertebbek közül:

- **AAreverb** - hagyományos algoritmikus FDN reverb, ami 200 presetet kínál.
- **Analogflux Impulse** - Voxengo Pristine 8 csatornás konvolúciós algoritmusából kifejlesztve.
- **BlueVerb** - 96 kHz mintavételezést is támogat. Gyári preseteket kap hozzá a felhasználó. Minden paramétere automatizálható.
- **CSR - Classic Studio Reverb** - egy komplikáltabb FDN algoritmus. Mindenféle reverb típust kínál. Egyik legjobb plugin reverb.
- **PSP EasyVerb 9** - zengető algoritmust kínál. 96 kHz-es mintavételezést támogat. Könnyen kezelhető, közepes minőségű.
- **Pristine Space** - egy igen precíz konvolúciós plugin. Az impulzus mintákat 8 csatornán át tudja kezelni.
- **Real Verb** - igen jó minőségű plugin, egyszerű kezelés. Mivel a hangforrás és a hallgató pozícióját is szabályozni lehet, így térszimulátornak tekinthető.
- **RoomReverb** - tiszta hangzású kisebb tereket modellez hihető minőségben.

8. Összefoglalás

Szakdolgozatom témája a virtuális hangtér-szimuláció megoldási lehetőségeinek keresése volt. A munkát hosszas előkészítő fázis előzte meg, melyben a virtuális hangtér-szimuláció és a konvolúciós zengetés technológiáit kutattam. Tekintve, hogy szakirányos képzésem alatt csak a stúdiótechnika című tantárgyam foglalkozott részletesen akusztikával, jórészt a magyar és idegen nyelvű szakirodalmakra támaszkodtam.

A szakdolgozatom első fejezetei a hang fizikai sajátosságairól, illetve terjedésének tulajdonságairól szólnak. Ezen részek között szerepel még az emberi hallás, és a hangtérre vonatkozó elméleti alapok is. Próbáltam lépcsőzetesen felépíteni a fejezeteket úgy, hogy teljesen az akusztika alapjaitól kezdve fokozatosan - bár nem nagy részletességgel - az olvasó eljusson a hangtechnika átfogó alapjáig.

Ezután az térbeli hallás jellemzőivel, és az azt leíró függvényekkel foglalkoztam. Választ kaphatunk a teremakusztikával kapcsolatos alapvető kérdésekre, és az utószengési időről, annak számítási módjairól kaphatunk képet. A konvolúcióval, mint a szakdolgozatban főszerepet játszó fogalomról részletesen írtam: az impulzusválaszok felépítésének taglalása után a konvolúció matematikai háttérével foglalkoztam, ami más műszaki (főleg villamosmérnöki) tudományágakban is gyakran felbukkan. A konvolúcióról való elméleti tudnivalókat a következő részben foglaltam össze. A konvolúció gyakorlati alkalmazásánál az itt nagyon fontos átviteli függvényekről, valamint az impulzusválaszokról, azok teremszimulációban betöltött szerepéről, illetve az impulzusválaszok méréséről írtam. A fejhallgató kiegyenlítés témája szintén ide kívánczolt, csakúgy mint a konvolúción alapuló teremszimulációs programoknál leggyakrabban (sőt szinte kizárólagosan) alkalmazott wave állományok ismertetése.

Számomra legérdekesebbek az Adobe Audition 1.5 programmal végrehajtott szimulációk voltak, az ezzel foglalkozó részt magának a programnak az ismertetésével kezdtem. A program lehetőségeiről, a vele való munkáról talán kissé rövid, de átfogó leírást adtam. Ezután következtek a teremimpulzus-válaszokkal végrehajtott konvolúciós feladatok, amelyeknek a virtuális hangtér létrehozása volt a célja. Megvizsgáltam az Audition beépített, konvolúción alapuló funkcióit is, valamint egy segédprogram-csomag által nyújtott újabb lehetőségeket. Végezetül más, konvolúción alapuló programokat is megvizsgáltam, ezek között az Altiverb-et. Ez összehasonlítási alapot adott az Auditionnal végrehajtott műveletekhez.

Arra a következtetésre jutottam, hogy az általánosan hozzáférhető Adobe Audition programmal végrehajtható a virtuális hangtér-szimuláció, mint kitűzött feladat. Ennek előnye, hogy míg sok más program több-kevesebb regisztrációs költség árán, esetleg különféle korlátozásokkal, megkötésekkel tehetjük ezt, addig az Audition egy sokak által ismert, a hangtechnikában leggyakrabban alkalmazott professzionális hangszerkesztő, annak számos lehetőségével. Az eredmények kielégítőek. Csak egy nyitott kérdés maradt, miszerint az Audition nem dolgoz fel néhány állományt. Ez esetleg egy jövőbeni kisebb kutatás témája lehet.

Ezúton szeretném megköszönni konzulensemnek, Dr. Wersényi Györgynek a segítségét és támogatását szakdolgozatom megvalósításához.

9. Felhasznált irodalom

Géher Károly – Híradástechnika
Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 2000

Dr. Wersényi György: Műszaki Akusztika; Győr, 2004

Dr. Wersényi György: Térbeli hallás; Győr, 1998

Kurutz Imre - Szentmártony Tibor: A műszaki akusztika alapjai.
Műegyetemi kiadó, 2001

Dr. Kuczmann Miklós: Jelek és rendszerek jegyzet; Győr, 2005

Dr. Wersényi György: Virtuális hangtérszimuláció és a binaurális technológia;
Győr, 2007

Akusztikai alapok, hang, elektroakusztikai átalakítók
<http://www.hit.bme.hu/people/granat/elak6.htm>

Room Acoustics Modeling
<http://pcfarina.eng.unipr.it/Aurora/SAW/RoomSim.html>

Detection of room reflections from a binaural room impulse response
http://www.dafx.ca/proceedings/papers/p_215.pdf

Házimozi tervezés
<http://www.hazi-mozi.hu/cikkshow.php?cid=505&old=3>

Fourier integrálok és Laplace-transzformáció
<http://www.uni-miskolc.hu/~amper/ev2/fe2/kommunikacio/Fourierd2.doc>

Virtuális akusztikai valóság és auralizáció
http://www.vibac.hit.bme.hu/documents/84tv2007_hcs.pdf

Wave állományok - Wikipédia
<http://hu.wikipedia.org/wiki/WAV>

Adobe Audition 1.5 termékbemutató (angol)
http://downloads.szofrtver.hu/adobe/pdf/audition_nfhs.pdf

Adobe Audition 1.5 User Guide
http://download.adobe.com/pub/adobe/magic/audition/win/2.02/audition_user_guide.pdf

Aurora segédprogram csomagok Audition 1.5-höz:
<http://www.ramsete.com/aurora/homeold.htm>

Audioease Altiverb, impulzusválaszok:
<http://www.audioease.com/Pages/Altiverb/AltiverbMain.html>