

**Debreceni Egyetem
Informatika Kar**

**A házi-mozi rendszerek beállítási problémáinak vizsgálata MATLAB
program segítségével**

Témavezető:
Dr. Papp Zoltán
Egyetemi adjunktus

Készítette:
Jenei Tibor
PTI Msc

**Debrecen
2010**

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
1.1. A zene és a kép világáról	4
1.2. A térről és hangzásról	4
2. Célkitűzés	6
2.1. Házimozi rendszer kalibráció – másképp mint általában	6
2.2. A többcsatornás hangzásreprodukció fejlődése	6
2.2.1. Dolby Stereo	6
2.2.2. Dolby Surround	7
2.2.3. Dolby Surround Pro Logic	7
2.2.4. Dolby Digital	7
2.2.5. DTS	8
2.2.6. Dolby Digital EX	8
2.2.7. THX	8
2.3. A stereo hangzás kialakítása	9
2.4. A több csatornás hangzás (5.1) kialakítása	9
2.5. A hangvisszaverődések negatív hatása	10
2.6. A hangsugárzók ajánlott elhelyezése 5.1 hangszóró esetén	12
2.7. A hangtér és a reflexiók kapcsolata	15
3. A MATLAB programkörnyezet	18
3.1. A program bemutatása	18
3.2. Műveletek végzése és programozása	19
4.1. A méréshez használt készülékek	21
4.2. Mérőjelek leírása	22
4.2.1. Fehérzaj	22
4.2.2. 1000 Hz impulzus jel	22
4.2.3. Burst jel	23
4.3. Teljes spektrum előállítása	23
5. A kalibráció folyamata	24
5.1. A hangerő beállítása	24
5.2. Késleltetési idő beállítása	27
5.2.1. Beállítási problémák	30

6. Frekvenci menet mérése.....	30
6.1. Akusztikai viselkedés	33
6.2. Adaptív szűrő.....	35
7. Az adaptív szűrés eredményei	38
A subwoofer hozzáadása a rendszerhez	40
Összefoglalás	43
Köszönetnyilvánítás.....	44
Irodalomjegyzék:.....	45

1. Bevezetés

1.1. A zene és a kép világáról

Az embereknek már nagyon régóta igénye a valós környezet minél tökéletesebb, valóság hűbb reprodukciója. Eleinte megelégedtek csak a hang, a zene életszerű visszaadásával. Már az is csodálatos élmény volt, amikor az egész teret betöltötte a muzsika, és az ember elfelejtette napi gondjait, problémáit. Szinte hihetetlen, és fantasztikus, hogy régi és mai nagy művészek előadásában hallgathatjuk kedvenc műveinket. Megfizethetetlen az az érzés, amikor szinte együtt lélegzik hallgató és előadó, érezvén az a terem teljes atmoszféráját.

De az igény meg volt, és meg is van arra, hogy mind ez otthon saját környezetben is elérhető legyen vetített képpel. A projektorok, plazmák és a többcsatornás erősítők elterjedésével ez a probléma is megoldódni látszik. Szemtől-szembe kerülhetünk muzsikussal, színészekkel, és már nem csak a képzelet adja vissza a művész érzéseit, hanem a látható kép.

De sokszor probléma az akár hangban, akár képben túldimenzionált reprodukció. Nagyon zavaró az, amikor a pár centi nagyságú autó úgy dübörög, hogy a falakat is le akarja bontani, vagy óriási kiterjedésű robbanás hangja éppen csak súrolja a hallásküszöbünket. A kép és a hang méretének és dinamikájának az összhangját úgy kell megválasztani, mint egy nagyzenekari műben a hangszerek elhelyezkedését és arányát a többiekhez képest.

A jól megválasztott eszközökkel felépített tér a realitás egyedi, de megismételhető atmoszféráját építi fel, ami egy teljesen*más világ*,

1.2. A térről és hangzásról

A felsőfokú hangreprodukció feladata nem lehet más, mint a zene lényének hű szolgálata. A muzsika maga viszont az időnek és a térnek a művészete. Az idő kérlelhetetlen múlásának és a pillanat megismételhetetlen varázsának antagonisztikus feszültsége magában hordozza a lehetőséget, hogy a művész az éteri világok vibrációját a múltó másodpercek hangrezgéseire leképezve, számunkra is átélhetővé tegye a Létezés élményét. Ez az idő művészete, mely a zeneszerző és az előadó együttműködéseként testesül meg. A zene tárgya, a hang rezgése viszont mindezt a művészi produktumot kizárólagosan a térben tudja realizálni. Minden hangra építve jellemző az időbelisége (frekvencia, amplitúdó, spektrum, fázis, stb.), mint a térbelisége. Nos, ez utóbbira vonatkozó közérthető jellemzőket nem tudunk felsorolni, s ez nem a mi hibánk.

Tudomásul kell vennünk, hogy a tér önmagában nem egy tulajdonságok nélküli, üres kiterjedés, mely zsák módjára befogadja az anyagot, hanem egy rendkívül specifikus, egyedi és ismétелhetetlen médium, akárcsak az idő. Mi sem bizonyítja ezt jobban, mint amikor a legszínvonalasabb high end készülékek tudásukhoz mérten „gyengén” muzsikálnak némely helyen. A térben az energia állandóan fluktuál, és egyszersmind létrehoz egy rajzolatot, mintázatot, mely csupán a tér sajátja. Ebben a rajzolatban a tér saját belső minősége tükröződik az anyagi világban, ahogyan a mágnes erőterét jeleníti meg a köré szórt vasreszelék. A tér saját minősége igenis realitás, melynek a vizsgálatához a mai tudományos világnézet filozófiája igen kevés gondolati táptalajt és még kevesebb eszközt kínál.

Azt javasolom tehát mindenkinek, hogy legyen bátorsága a "saját fülére" hallgatni és önállóan véleményt alkotni. Ahhoz, hogy mások véleményéből a szubjektív faktorokat kiszűrjük, és azokat, mint számunkra hasznos információt felhasználjuk, ahhoz nagyon nagy gyakorlat kell. Arra is törekedni kell, hogy a rendszer minden tagja azonos hangzásképeségű legyen, mert csak ekkor alakul ki egyensúly.

2. Célkitűzés

Dolgozatom témája azzal kíván foglalkozni, hogy egy valós környezetben az 5.1-es hangrendszerből milyen paraméterek mellett lehet a legjobb hangzást, élményt kihozni. Milyen mérések szükségesek az optimális beállításhoz, a szoba akusztikájának, a hangfalak frekvencia görbéinek figyelembe vételével. A méréseket a MATLAB programkörnyezetben saját fejlesztésű, és beépített programokkal fogom elvégezni, és kiértékelni: Ezáltal áttekintést szeretnék adni a programkörnyezet működéséről, és megpróbálok rávilágítani a jelenleg működő egyszerűbb kalibráló módszerek közötti különbségekre is.

2.1. Házimozi rendszer kalibráció – másképp, mint általában

Talán kezdhethetnénk a téma fejtegetését egy korábban felmerülő kérdéssel is: Miért szeretnék a házimozsi rendszerek beállításával foglalkozni?

Több ismerősömnél járva, arra a megállapításra jutottam, hogy hiába van a jó minőségű készüléke, ami saját magát „beállította”, de a valódi tér érzetet nem képes reprodukálni. Legtöbbször a túldimenzionált subwoofer jelenti a problémát. Sokan azt hiszik, hogy ha a sub dübörög, akkor van jól beállítva és az a valódi élmény, de ez tévedés. Sajnos a legtöbb szobának a rezonanciapontja a subwoofer keresztezési frekvenciája közelébe esik, és ez folyamatos gerjesztést, rosszabb esetben egy jól meghatározható frekvencián állóhullám alakul ki. Igaz a mély hangoknak nincs irányuk, de dinamikájuk jóval nagyobb mint a spektrum többi részének.

2.2. A többcsatornás hangzásreprodukció fejlődése

2.2.1. Dolby Stereo

Az 1970-es évek közepén Dolby Laboratories cég a mozifilmek hangminőségének javítására vonatkozó kísérletekbe kezdett. Ez lett a Dolby Stereo hang, amely az eredeti szalagon található stereo sáv helyére került. Az elvégzett tesztek bizonyították, hogy az ún. Dolby A típusú zajcsökkentési technikával rögzített, és lejátszott sztereó hang sokkal tisztábban, teltebben szólal meg, mint az régebbi, hagyományos módon rögzített hanganyag.

A Dolby Stereo-val több probléma is adódott. A professzionális zenehallgatáshoz nem volt elég muzikális, és a valós hangképbe is belenyúlt. Az élethű hangzásmegvalósításához a két sáv (stereo) nem elegendő a moziban, mivel a mozivászon szélessége miatt szükséges a bal és jobb hangsugárzók között legalább egy hangszórót elhelyezni (center). A filmes technikában a stereo és surround fogalmak közötti határ szinte elmosódott, ezért a surround csatorna is egyre nélkülözhetetlenebbé vált. A rögzítendő hangcsatornák számának növelésével a Dolby Stereo rendszer zajossága is jelentősen nőtt volna.

A megoldást a már előzőekben a quadrophoniá-nál kikísérletezett mátrixos technika felhasználása hozta meg, amely speciális algoritmusok segítségével több hangcsatorna tárolására nyit lehetőséget a meglévő két hangsávon. Ez a technika lett a Dolby Surround a Dolby Stereo rendszer professzionális, a mozik által is lelkesen fogadott hangzás.

2.2.2. Dolby Surround

A Dolby Surround rögzítésnél a bal, a közép, a jobb, és a surround csatornákat keveri rá a már jól ismert kétcsatornás stereo rendszerre. A kódolást, és a dekódolást speciális Dolby Cinema Processor-ok végzik, így ezen eljárások használatával az opcionális subwoofer (LFE - Low Frequency Effects) csatorna is előállítható lesz a rögzített négy csatorna mély komponenseinek leválasztásával.

A Dolby Surround (DS) szabvány bevezetése az 1982-ben történt.

A DS-dal rögzített hangsávok mindegyike tartalmazta az előzőekben leírt négy csatornát, viszont az egyik legfontosabb csatorna a center, dekódolására még nem volt lehetőség. Ezt a problémát csak 1987-ben sikerült megoldani.

2.2.3. Dolby Surround Pro Logic

1987-ben végre utolérte a házimozi az eredeti mozi hangzást: elkezdtek forgalmazni az első Dolby Surround Pro Logic dekóderrel ellátott erősítőket. A Pro Logic egy új dekódolási eljárás, amellyel a teljes Dolby Surround kódolású hangteret lehet visszaállítani. Napjainkban már minden Dolby Surround erősítő tartalmazza a Pro Logic típusú dekódet.

2.2.4. Dolby Digital

A Dolby Laboratories a '80-as években, a Dolby Surround elterjedése előtt már elkezdett a digitális audio irányába hangzási kutatásokat folytatni. A tapasztalatok alapján a filmes

szakma által is a legjobbnak tartott 5.1-es konfiguráció mellett tették le a voksot. Az 5.1-es kialakításban az 5 hangszóró a következőképpen oszlik el. két front (bal, jobb), a center, és a két surround (bal, jobb), a '.1' pedig csökkentett sávszélességű subwoofert jelképez. Az öt csatorna teljes sávszélességgel (50 - 20000 Hz) rendelkezik. A Dolby Digital 1992 óta a legnépszerűbb hangszabvánnyá nőtte ki magát, a minőségét csak a később megjelenő DTS képes túlszárnyalni.

2.2.5. DTS

A Digital Theatre System azaz DTS, szintén a Dolby Digital esetében már megismert 5.1-es hangsugárzó konfigurációra épül, viszont háromszor a hanganyagának tárolásához háromszor nagyobb területre van szükség, ebből következően a hangminősége is sokkal jobb. A DTS-t, főként profi többcsatornás hangrögzítésre használják (koncertfelvétel), mivel erre a Dolby Digital legtöbbször alkalmatlan.

2.2.6. Dolby Digital EX

A legújabb hangszabvány. A Dolby Laboratories egyszerűen kiterjesztette a Dolby Digital-t 6.1-es konfigurációra, sőt megjelentek a 7.1 konfigurációk is. Állításuk szerint nagyban növeli a térélményt és a valóság modellezésére sokkal jobban használható, mint a Dolby Digital esetében. A gyakorlatban nem tapasztalható túlságosan nagy különbség az 5.1 és a többi konfiguráció között, de sokan vásárolnak ezért új készüléket. Fontos tudni, hogy a legtöbb DVD, vagy Blue-ray film 5.1-es kódolással van rögzítve.

2.2.7. THX

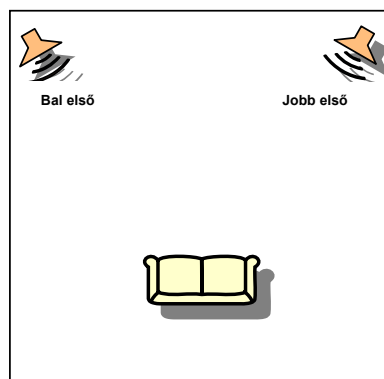
A THX valójában kilóg a sorból, mert igazából nem egy szabványról beszélünk, hanem egy professzionális minősítésről. Azok az audio technikai eszközök, különleges médiák, hang-, ill. filmanyagok kaphatják meg a THX minősítést, melyek mind hang, mind kép minőségükkel kiemelkednek az átlagból, és emellett rendkívül szigorú hangtechnikai paramétereket is teljesítenek. A THX minősítésű házimozsi erősítők, DVD, Blu-ray filmek átlag feletti audio élményt nyújtanak. A THX minősítést csak és kizárólag George Lucas cége, a Lucasfilm Ltd. adhatja ki.

A több csatornás hangzás otthoni kialakítása a stereótól az 5.1-ig

2.3. A stereo hangzás kialakítása

A történet az otthoni stereo zenehallgatással kezdődött. Az igény az volt, hogy minél valóságosabb hangzást próbáljunk elérni a rendelkezésünkre álló hangtechnikai eszközökkel. A hangzás beállítása ekkor még nem a különböző hangprocesszási eljárásokkal történt, hanem a hangsugárzók optimális elhelyezésével. Ekkor még nem volt lehetőség a jel késleltetésének beállítására, csak a hangsugárzók hangerejét lehetett állítani. Ezért figyelembe kellett venni a szoba akusztikáját, a készülékek falaktól való távolságát. Ha ezt sikerült jól megtalálni akkor a stereo rendszer is képes volt háromdimenziós teret leképezni. A rendszer egyszerűségéből adódóan nem voltak, időzíteni problémák, mivel a két hangszóró pozícióját, tökéletesen meg lehetett határozni.

A stereo hangzás esetében, bármilyen jó rendszer beállítás esetén is, a tér hallgató előtt kerül leképezésre, tehát mint kívülálló szemlélte az „eseményeket”.



1. ábra Stereo rendszer

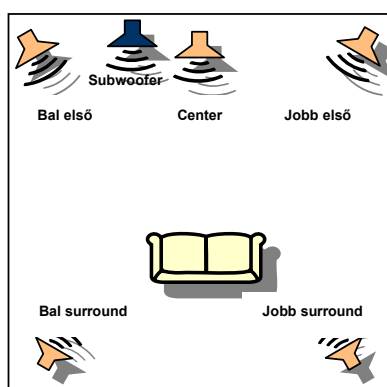
2.4. A több csatornás hangzás (5.1) kialakítása

A projektorok és a DVD térhódításával, egyre több igény merült fel arra, hogy a hallgató, illetve néző otthoni körülmények között is részese lehessen az élménynek. Ehhez viszont az szükséges, hogy az információk, ne csak elölről, hanem a tér más pontjairól is érkezzenek, mint a tradicionális moziban, úgy hogy a néző az „események” középpontjába kerüljön.

Tapasztalatok szerint a különböző helyiségekben (ez lehet pl. méret, szigetelés, bútorzat) ugyanazon rendszerek különböző képpen szólnak meg. Mindenki számára viszont az optimális az lenne, ha a hangtér leképzése független lehetne a helyiség paramétereitől, és

valóban úgy szólna meg, ahogy a stúdióban elképzelték. Sok esetben a stereo hangzás életszerűbb, magávalragadóbb mint a több hangszórós rendszerek által létrehozott akusztika. Viszont a filmek nézéséhez nélkülözhetetlen az 5.1-es kódolású hang, és a berendezésekben található DSP (Digital Signal Processor). De ennek a több hangsugárzóból álló rendszernek a nem megfelelő beállítása esetén, nem csak a tér leképezése nem lesz tökéletes, hanem maga a filmnézés, vagy a zenehallgatás is fárasztóvá válik.

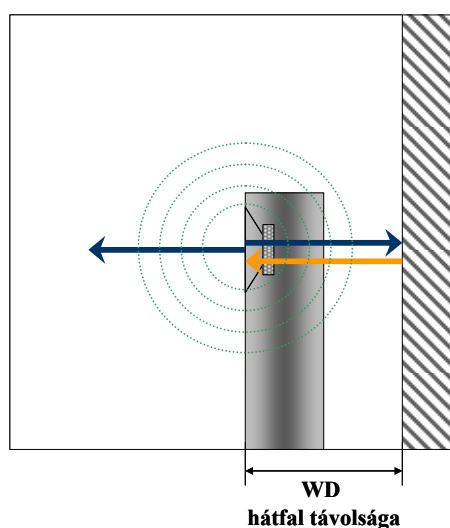
Tehát hangsúlyt kell fektetni a hangszórók pontos elhelyezésére, nem szabad megelégedni azzal, hogy letettem valahova, és a kalibrációs rendszer kijavítja a hibákat.



2. ábra 5.1 rendszer

2.5. A hangvisszaverődések negatív hatása

Legfontosabb az elhelyezett hangsugárzók alacsonyfrekvenciás átvitele szempontjából a közelükben lévő falak vagy más visszaverő felületek kritikus távolsága. Ha egy hangsugárzót egy fal elé állítunk, akkor az abból kilépő mélyhangok minden irányban terjedve eljutnak a mögötte lévő falhoz is, és innen visszaverődnek a hallgatási pozícióirányába is (3. ábra narancssárga nyíl jelzi a visszavert hangot). Ez a visszavert (reflektált) hang összeadódik a hangsugárzóból közvetlenül irányuló direkt hanggal (ezt a kék nyíl jelzi).



Kioltási frekvenciák		
WD (m)	c (m/sec)	$f_k = c/4 \cdot WD$ (Hz)
0,1	344	860,00
0,2	344	430,00
0,4	344	215,00
0,6	344	143,33
0,7	344	122,86
0,8	344	107,50
0,9	344	95,56
1	344	86,00
1,1	344	78,18
1,2	344	71,67
1,3	344	66,15
1,4	344	61,43
1,5	344	57,33
1,6	344	53,75
1,7	344	50,59
1,8	344	47,78

3.ábra Hangvisszaverődés és kioltási frekvenciák

Ha a visszavert hang által bejárt teljes távolság megegyezik a hang hullámhosszának (hang sebességének és frekvenciájának hányadosa) felével, akkor ez a reflektált hang és a direkt hang pont ellenfázisba kerülnek (a köztük lévő fáziseltérés pont 180 fok lesz) és gyengítik, legrosszabb esetben kioltják egymást. Vagyis ha a hangsugárzó előlapja egy adott frekvencián pont negyed-hullámhossz távolságban van a hátfaltól, akkor ezen a frekvencián felléphet egy igen jelentős kioltás, ami lerontja a hangsugárzó általában egyenletes alacsonyfrekvenciás átvitelét.

A kioltási frekvenciát az $f_k = c / 4 \cdot WD$ képlettel számoltam ki, ahol c a hang sebessége 344 m/sec (20 °C), WD a hátfal távolsága a hangsugárzó előlapjától.

A kioltás mértéke sokban függ attól, hogy mekkora a reflektált hang amplitúdója a direkt kisugárzott hanghoz képest, tehát nagyban befolyásolja azt a visszaverő felület hangvisszaverő képessége, és mérete. Ebből következik, ha egy ilyen kioltás hallhatóvá válik, akkor ezt nem lehet semmiféle hangszínszabályzással (DSP-vel) korrigálni, mivel a hiányzó rész pótlásával mind a direkt, mind a reflektált hang energiáját egyformán növeljük, és ebből adódóan a kettő összege továbbra ugyanaz marad.

A hangsugárzók frekvencia-átvitelében nemcsak a hátfali visszaverődések okozhatnak kioltásokat. Az oldalfalokról, a padlóról, és a mennyezetről, valamint bármely más nagyobb hangvisszaverő felületről a direkt hanghoz képest fél hullámhossznyi késéssel érkező reflektált hang is kioltást eredményez. A kioltás frekvenciáját itt is ki tudjuk számolni:

$f_{k_e} = c/2 \cdot (DR - DL)$, ahol c a hang sebessége, DR a hangsugárzó és a hallgatási pont távolsága a reflektáló felület érintésével, DL a hallgatási hely és a hangsugárzó közvetlen távolsága.

Arra kell törekedni, hogy a hallgatás helyén minél többet halljunk a hangrendszerünk hangsugárzóiból közvetlenül érkező és minél kevesebbet a különböző felületekről visszaverődő hangokból. A hangsugárzók megfelelő elhelyezésével, kalibrálásával a visszaverődések csökkenthetőek, esteleg megszüntethetőek.

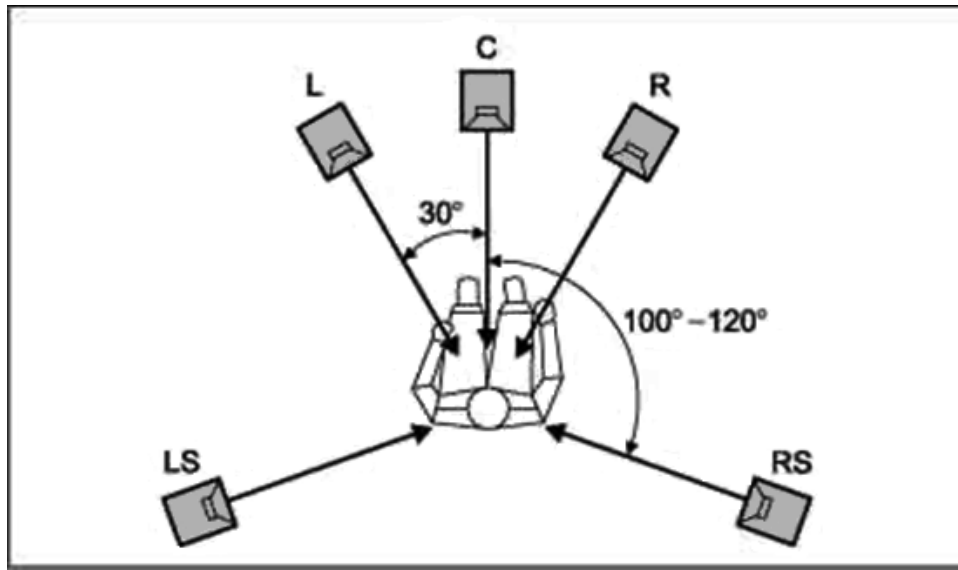
A másik probléma, ha egy hangsugárzót egy, a hullámhosszhoz képest nagy hangvisszaverő merev felület mellé állítunk, akkor a sugárzási tér a felére csökken, és a hangsugárzó által lesugárzott amplitúdó megduplázódik (+6 dB-vel növekszik), ez a valóságban a néhány száz Hz-es tartományban érvényesül. Ezért nagyon fontos az 5.1-es rendszerek mélysugárzójánál különösen odafigyelni, a beállítására, mivel általában a padlóra és a fal elé állított ubwoofert két felület is határolja, ami +12 dB amplitúdó emelkedést okoz, legrosszabb esetben, ha a sarokba állítjuk, akkor ez az emelkedés +18 dB is lehet. Ha természetes, élvezhető frekvencia-átvitelt szeretnénk elérni minden esetben, kompenzálni kell ezt az amplitúdó-kiemelést.

2.6. A hangsugárzók ajánlott elhelyezése 5.1 hangszóró esetén

A hangsugárzókat a hangstúdiókban az ITU¹-R BS.775-1 számú szabvány ajánlásának megfelelően rendezik el, ennek a beállítása lakás körülmények között nem mindig lehetséges, de mint az előzőekben említettem, érdemes erre törekedni. Egy másik ajánlás az ITU-R BS.1116-1 szerint a hallgatási hely körüli 2 - 4 méter sugarú kör mentén kell elhelyezni a hangsugárzókat. A hallgatási pontból, mint csúcspontból kiinduló elhelyezési szögeket a következő képpen kell meghatározni:

- a középvonal centerhez mutató egyenesét 0 foknak tekintjük.
- a bal és jobb első (front) hangsugárzóknak a vízszintes síkban 60 fokos szöget kell bezárniuk egymással, és 30 fokos szöget a centerhez képest
- a két hátsó hangsugárzót 100 és 120 fok közé kell elhelyezni. Ha kettőnél több hátsó sugárzót (surround) használnak 6.1 vagy 7.1 elrendezés esetén, akkor azokat szimmetrikusan a középvonaltól 150 és 160 fokra kell elhelyezni (ha csak egyet, akkor azt pont 180 fokra).

¹ ITU – International Telecommunication Union (Nemzetközi Távközlési Egyesület)



4. ábra ITU-R BS.775-1 szerinti pontos elhelyezés

A szabvány ajánlása szerint a hangsugárzóknak pontosan egy képzeletbeli kör mentén kellene elhelykedniük. Ez azért fontos, hogy elkerüljük az különböző csatornák közötti amplitúdó és jelkésleltetési eltéréseket. Tegyük fel hogy, ha egy effektus elem (mondjuk egy helikopter) a jobb oldali csatornából a centeren át a bal oldali csatornába megy át, és a center hangsugárzó 2,5 centivel eltér akár pozitív, akár negatív irányban a körívben meghatározott pontos helyéhez képest, akkor 500Hz-en egy amplitúdó eltérés lesz tapasztalható a hallgatás helyén az említett csatornák eltérő távolságából adódó különböző jelkésleltetés miatt. Az ITU lehetővé teszi, hogy a center hangsugárzót a bal és jobb oldali front hangsugárzók közötti egyenesre helyezzük, de ez esetben a center csatorna hangját a kellő mértékben késleltetni kell, hogy mindegyik csatornából azonos időben érkezzon a hang a hallgatási pozícióba. A hallgatás helyéhez képest eltérő hangsugárzó távolságokból adódó késleltetési és amplitúdó eltérések ugyan a hangrendszer elektronikájával (például az AV erősítő DSP -jével) ugyan kompenzálhatóak, de a hangsugárzók sugárzási karakterisztikájának távolságtól függő eltérései sajnos nem.

A front magassugárzók akusztikai sugárzási vonalának (az un. axisnak) az ITU ajánlás szerint a hallgató fülmagasságában kell lennie, amely ülő ember esetén kb.1,2 m. Ez a magasság az előző részben leírt frekvencia kioltás szempontjából is jó választás, mert mind a padló, mind a mennyezet elég távol vannak a hangsugárzóktól ahhoz, hogy az azokról származó korai

visszaverődések kioltási problémát okozzanak. Ettől a magasságtól az emberi hallás fiziológiája miatt (fül, agy) vízszintes síkban pontosabban történik a hangok irány érzékelése, mint függőleges síkban. Ezért a front bal és jobb valamint a center hangsugárzók magasságbeli elhelyezése közötti eltérése a hallgatási ponthoz viszonyítva a megengedett eltérés ± 10 fok is lehet, viszont javasolt a bal és jobb oldali magassugárzót azonos vízszintes síkba elhelyezni, a center ettől térhet el, úgy, hogy a hallgatási síktól való teljes eltérése maximum ± 10 fok. A hátunk mögül érkező hangok helyét még kevésbé tudjuk meghatározni, ezért a hátsó hangsugárzók a frontsugárzók magassugárzóinak magasságához képest maximum 15 fokkal magasabban is lehetnek. Ennél nagyobb magasságbeli eltérés már az előlről érkező és a surround hangtér koherenciájának megbomlását eredményezheti.

A előzőekből következik, hogy a center hangsugárzót célszerűbb inkább magasabbra tenni, mint mélyebbre elhelyezni. A túlságosan alacsonyan elhelyezett centersugárzó ugyanis túl közel kerülhet a padlóhoz, és az arról visszaverődő reflexiók a kritikus középfrekvenciás tartományban színezhetik el a hangot.

A hangsugárzókat a hallgatási hely felé irányítva kell elhelyezni. Ha valamilyen elhelyezési probléma elkerülése miatt, lehet akár esztétikai is, a center hangsugárzót a megengedett értéknél valamivel magasabbra kell elhelyezni, akkor azokat a hallgatási pozíció felé kell dönteni.

A ma forgalomban lévő komolyabb A/V erősítőkben már beépített kalibrációs programok találhatók, amelyek segítenek beállítani az otthoni rendszerünket. A kommersziális home cinema rendszerekben két féle eljárást használnak. (Legtöbb cég az AUDYSSEY Laboratories rendszerét használja)

- Az egyszerűbbek működési elve az, hogy megkísérelnek az adott mérési helyre egy helyes beállítást találni a szobában. Egy mérési pontot használnak, legtöbbször hangsugárzónként egy complex mérőjellel. Ennél a módszernél legnagyobb probléma az, hogy a mérés alapján csak két parametert állítanak be a késleltetési időt (delay) és a hangsugárzók hangerejét, hogy az adott mérési pontban a hang erőssége minden hangsugárzóból azonos erősségű legyen, és azonos időben (késés nélkül) érkezzon
- A magasabb szintű rendszerek már több mérési pontot használnak és megpróbálják kijavítani a ezen mért adatok alapján a szoba akusztikájából eredő problémákat, és az

előző pontban leírt paramétereiket. Viszont ez a rendszer hajlamos a meghatározatlan akusztikai problémák elsimítására, és ezért nem javítja azokat. Például, ha van egy csúcs 200 Hz-en az egyik mérési helyen és a másik ponton pedig beszakadás (tipikus szoba), akkor a két mérés átlaga kiüti egymást, és nincs korrekciós kísérlet.

Nem várjuk el, hogy pontosan megmondják nekünk, mit, hova, és hogyan kell elhelyezni, de útmutatást adhatnak a helyes kialakításhoz. E szimulációk sikeressége pedig jórészt a felhasznált modellek pontosságán múlik.

2.7. A hangtér és a reflexiók kapcsolata

2.7.1. A hang terjedése

A hang térbeli „valóság hű” reprodukciója esetén, fel kell ismerni, hogy egy olyan komplex problémával állunk szemben, aminek a tulajdonságait meg kell vizsgálni, azért, hogy megérthessük a rendszer elemeinek működését. Első és legfontosabb tényező maga a hang, amely a levegő apró nyomásrezgéseiként írhatók le.

A tér egy meghatározott pontjában a fellépő nyomásváltozásokat a következő képlettel tudjuk leírni:

$$P(t) = P_0 + A \cdot \sin(2\pi f t + \varphi)$$

Ahol P_0 a légköri nyomás, a $P(t)$ a pillanatnyi nyomás, A a nyomásváltozás csúcserőssége, f a frekvencia, a φ pedig a fázis helyzet értéke. Az emberi hallás a 20 Hz és 16 kHz közötti frekvencia tartományt képes érzékelni. Viszont kutatások bizonyították, hogy a 20 Hz alatti, ún. infrahangok, és a 20 kHz feletti ultrahangok is nagyban befolyásolják környezetünk érzékelését.

A jel erősségének mérésére a hangnyomás effektív értékéből származtatott mennyiséget használjuk. ($P_{eff} = \sqrt{2} \cdot A$), a hangnyomásszint számításához szükségünk van még a hallásküszöb értékére, amely a még legkisebb érzékelhető hangnyomás, ez 1 kHz-es frekvencia esetén $P_0 = 20 \mu Pa$. Az előzőek felhasználásával a hangnyomásszint a következőképp alakul:

$$P = 20 \lg \left(\frac{P_{eff}}{P_0} \right)$$

Hangintenzitás (I , W/m^2): egységnyi felületen, időegység alatt átáramló hangenergia.

Hallásküszöb 1000Hz-en: $I_0 = 10^{-12} \text{W/m}^2$. Hangintenzitás szint (dBel): $10 \lg(I/I_0)$.

2.7.2. A hang akusztikus felbontása

A most mérésre kerülő akusztikus jelenségek tárgyalásánál felhasználok azt a meghatározó fontosságú tényt, hogy az akusztikus jelenségek nagy része leírható a lineáris akusztika keretében. Esetemben a linearitás annyit jelent a mérési rendszerre vonatkozóan, hogy ha megduplázzuk a rendszerre ható gerjesztést, akkor a rendszer által adott válaszjel is megduplázódik. Tehát, ha két egyidejű gerjesztés hat, akkor a rendszernek a gerjesztésekre adott eredő válasza egyenlő lesz az egyes gerjesztésekre külön-külön adott válaszok összegével. Ez a szuperpozíció elve. A szuperpozíció elvének az akusztikában alkalmazhatóságából következik, hogy ha egy adott térrészen egynél több hanghullám halad keresztül egyszerre, akkor ezek egymást nem befolyásolják, tehát a közös terjedés térrészen történő áthaladás után ugyanúgy terjednek tovább, mintha nem lett volna több hanghullám jelen. Viszont ebből következik, hogy magában a közös terjedési térrésztében az akusztikus tér megváltozik.

Az akusztikus jelenségek linearitásának további következménye egyrészt, hogy egy bonyolult akusztikus jelre alkalmazható az egyfrekvenciás komponensekre történő felbontás (azaz a *Fourier* analízis), másrészt, hogy az akusztikus rendszerek külső gerjesztésre adott válasza leírható az átviteli függvény elv alkalmazásával.

2.7.3. A Fourier elv

A *Fourier* elv szerint minden időbeli jel előállítható különböző egyfrekvenciás jelek összegeként, amennyiben ezeknek az egyfrekvenciás komponenseknek az amplitúdóját, illetve fázisát megfelelően választjuk meg. Egy időjel *Fourier* spektruma nem más, mint a frekvencia függvényében megadott amplitúdók és fázisok. *Fourier* analízisnek nevezzük, az időjelhez tartozó spektrum meghatározását, a hozzátartozó matematikai műveletet, amelynek segítségével a spektrum meghatározható, *Fourier* transzformációnak nevezzük. A *Fourier* transzformáció elvégzésekor, mind az amplitúdó, mind a fázis spektrum meghatározásra kerül eredményeként, az esetek többségében csak az amplitúdó-spektrumot szokták vizsgálni, mivel a fázis-spektrum az amplitúdó-spektrumhoz képest legtöbbször nem hordoz további lényegi

információt. A *Fourier* transzformáció eredményeként a különböző frekvenciájú komponenseken kívül még a jelnek az átlagértéke is meghatározásra kerül. Az átlagértékkel kapcsolatban meg kell jegyezni, az átlagértéket szokás nulla-frekvenciás komponensnek is nevezni.

Fourier-transzformált:

$$F(x)(f) = X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp(-i2\pi ft) dt$$

A fordított matematikai műveletet, azaz a *Fourier* komponensekhez tartozó spektrumok alapján az időjel meghatározását *Fourier* szintézisnek hívjuk, a hozzá tartozó matematikai művelet az ún. inverz *Fourier* transzformáció.

Inverz *Fourier* transzformált:

$$F^{-1}(X)(t) = x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \exp(i2\pi ft) df$$

A vizsgálatok hátterét a Fourier transzformáció, és a rá épülő különböző szűrők használata fogja képezni.

3. A MATLAB programkörnyezet

3.1. A program bemutatása

Vizsgálataimhoz az amerikai The MathWorks Inc. által fejlesztett MATLAB programkörnyezetet választottam, mert működését tekintve kvázi valósídejű, és programsoros vezérlésű önálló, magas szintű programozási nyelv. Nevét a MATrix LABoratory mozaikszavaként kapta, és hű maradvá nevéhez kiválóan alkalmas komplex matematikai mérnöki számítások elvégzésére, és folyamat szimulációkra nagyobb adatmennyiségeken is.

A numerikus módszerekre, matematikai analízisre, algoritmusok fejlesztésére több mint 600 matematikai, tudományos és mérnöki függvényt tartalmaz, ezen kívül támogatja a hangprocesszálassal kapcsolatos eljárásokat is. A MATLAB jól struktúrált programnyelven könnyű különböző elemzéseket létrehozni, és megjeleníteni, vagy akár önálló alkalmazásokat is megvalósíthatunk benne.

A szoftverkörnyezet tartalmaz több alap-, és kiegészítő funkciót. A kiegészítő funkciók az alapfunkciók meghívásával képezhetők, melyeket akár szerkeszthetünk, vagy használatukkal új kiegészítő funkciókat építhetünk a programnyelvbe, ebből következően a MATLAB tulajdonképpen nyitott rendszer, ami tetszőleges funkciókkal bővíthető.

Beépített grafikai alkalmazásaival egyszerűen lehet kezelni a 2D-s és 3D-s ábrák létrehozását és szerkesztését. Képes egyszerű adatok, többdimenziós tömbök, vektorok, mátrixok, objektumok és a felhasználó által definiált adatstruktúrák kezelésére, feldolgozására.

Be- és kimeneti fájlszűrői segítségével képes írni és olvasni az elterjedtebb fájlformátumokat, így az EXCEL-t is. Más alkalmazásokhoz való kapcsolatok létrehozásához használja még a C, C++, Fortran, Java, ActiveX, vagy DDE felületeket. Jól áttekinthető, struktúrált felülete hatékony szerkesztési és hibakeresési programozói felületet nyújt.

A MATLAB moduláris felépítésű programcsomag, így az alapprogram mellé, a megoldandó feladathoz szükséges eszköztárakat (Toolbox) kell feltelepíteni amely beépített függvényekből felépített rutinokat tartalmaznak a definiált feladatcsoportokra.

A MATLAB az IEEE aritmetikát követi a belső számábrázolásában, vagyis létezik mindkét irányú végtelen, valamint a „nem szám” (NaN = Not a Number) is, amely definiálatlan matematikai műveletek eredménye. (Pl.: $2/0=Inf$, és $0*Inf=NaN$).

A MATLAB alapjait a mátrixokkal végzett műveletek (mátrixok létrehozása, indexelése, szorzása, invertálása, és a lineáris algebra alapvető műveletei) képezik. Ezek mellett azonban még sok beépített rutint tartalmaz, a numerikus integrálás, interpoláció, és a digitális hangfeldolgozáshoz fontos Fourier-transzformáció, differenciálegyenletek problémáira.

3.2. Műveletek végzése és programozása

A MATLAB környezet használható úgy, hogy programsoros módban egymás után beírva a parancsokat definiálhatunk változókat, azokon különböző műveleteket hajthatunk végre, elmenthetjük vagy megjeleníthetjük grafikusan adatainkat.

Abban az esetben, ha egy műveletsort többször szeretnénk felhasználni, akkor azt egy script fájlba elmenthetjük. Ez a fájl egy szövegfájl, viszont kiterjesztése a MATLAB saját fájltypusainak kiterjesztését kapják a *.m, illetve *.mex. Itt fontos megjegyezni, hogy a program más programnyelvekkel szemben alapértelmezetten nem készíti függetlenül futtatható fájlokat, a megírt programok forráskódjukban kerülnek mentésre, és legközelebbi futtatásukhoz a környezet futtatása is szükséges. A hagyományos szövegformátumban tárolt parancssorok, utasítássorozat mentésére a *.m fájl használatos, míg a C vagy C++ formában megadott parancsok a *.mex fájlokban kerülnek tárolásra. A programkörnyezet C nyelven íródott, talán ezért is, sok hasonlóság van a MATLAB és a C szintaktikája között.

Ha a fentebb megírt script fájlunknak egy megfelelő fejléct adunk, akkor az átalakul egy függvénné, melynek ráadásul mind a bemeneti, mind a kimeneti argumentumlistája változó hosszúságú lehet. A lokális és globális változókat a mint a legtöbb programozásnyelvben a MATLAB szintaktikájában is meg kell különböztetni. A programozás közben rendelkezésre állnak a megszokott elemek, mint - ciklusszervezés, elágazások- mellett az esetlegesen fellépő hibák lekezelésére alkalmas nyelvi eszközök is.

A MATLAB célja, hogy a változódeklarációkat, a tömb és struktúráképzést közvetlen matematikai formulákkal élve érhesse el a kívánt eredményt a programozó, ugyanis a változó első használatakor az abba kerülő adatnak megfelelő memórafoglalás történik meg az értékadásakor, amely foglalás később új, adat hozzáadásával bővíthető, illetve parancsok

segítségével megváltoztatható, így legtöbbször szükségtelen a változót előre definiálni. A MATLAB alapértelmezett változója a mátrix. Gyakorlatilag tetszőleges dimenziójú mátrix létrehozható, és számításkor tetszőleges részhalmaza kiválasztható. A változók neveire megkötés, hogy betűvel kell kezdődniük, illetve néhány foglalt nevet vagy fix változó nevét (pl.:pi) nem illendő felhasználni. A programsorok érzékenyek a kis és nagybetű különbségére, ezért 'a' és 'A' két független változó lehet. Lehetőség van strukturált változók létrehozására is, ahol az egyes szintek ponttal választhatók el.

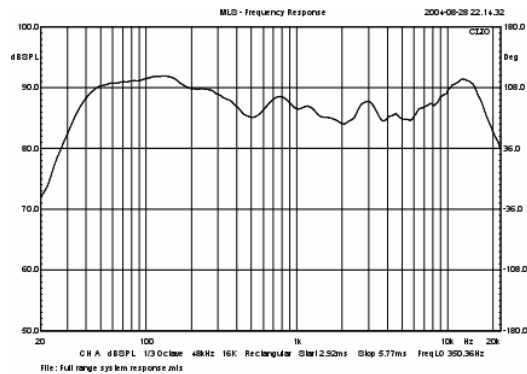
A MATLAB-on belül sok hivatkozás, funkció egy az egyben átkerült a C programnyelvből, némi írásmód- és jelölésváltoztatással, néhány funkció pedig szemléletesebb formát öltött, vagy speciális esetekre optimalizálva lett. Ilyen módon van lehetőség a C-ben megszokott fájlmegnyitási műveletet követni, illetve ha egy Microsoft WAV fájlt szeretnénk megnyitni, vagy bizonyos képfájlt, és rábízunk a formátum kezelését a MATLAB-ra, egy paranccsal rögtön egy adott változótömbbe helyezhetjük az adatsort.

Ha ezzel még nem elégszünk meg, létrehozhatunk programunkhoz egy grafikus kezelői felületet (Graphical User Interface vagy GUI), amelyen csaknem az összes, Windows környezetben megszokott kezelő- és kijelzőeszközt (menük, gombok, szövegbeviteli sáv, legördülő lista, kijelölhető választási lehetőségek – RadioButton ill. CheckBox – ,gördítősávok, valamint grafikonok, ábrák megjelenítése) elhelyezhetjük és felprogramozhatjuk. És ha ez még mindig kevés: programunkat, amely egyelőre MATLAB környezetben fut, kérésre a MATLAB lefordítja C, C++ vagy Fortran kódra, mellékelve a megfelelő függvénykönyvtárait, amelyek aztán egy végrehajtható programmá alakíthatók a megfelelő, előzőleg telepített C (Borland, Microsoft) esteleg Fortran fordító programok segítségével. Végül még egy hasznos lehetőséget meg kell említenünk: a MATLAB függvényei egy API-n keresztül meghívhatók egy általunk írt C vagy Fortran programból, vagyis a MATLAB indítása nélkül tudjuk használni annak rutinjait.

4. Mérés előkészítése

4.1. A méréshez használt készülékek

- Számítógép: Dell Inspiron 500, Dell Latitude 505 laptop
- Erősítő: NAIM NAIT 5i, AudioNote P3
- Front hagsugárzók: ProAc Studio 130
 - Frekvencia tartomány: 25 Hz-30 kHz ± 3 dB



5.ábra ProAc Studio 130 átviteli frekvencia görbéje

- Surround sugárzók: Castle Satellite
 - Frekvencia tartomány: 70 Hz-40 kHz ± 6 dB
- Center sugárzó: Castle Centre L.C.R.
 - Frekvencia tartomány: 70 Hz-40 kHz ± 6 dB
- Subwoofer: Castle Cube
 - Frekvencia tartomány: 35 Hz- 120 Hz állítható digitális szűrővel
- Mérőmikrofon: Behringer ECM-8000 és DENON DM-A409 kalibráló mikrofon

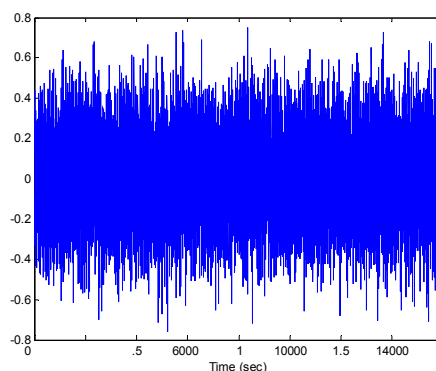
4.2. Mérőjelek leírása

A mérésekhez szükséges lesz fehérzaj, fűrészfű és szinusz jel generálása, viszont az utóbbi kettőből még különböző frekvenciákat is elő kell állítani.

4.2.1. Fehérzaj

Az egyik legfontosabb jel a fehérzaj lesz, mivel ez egy olyan jel, amelynek spektruma konstans. Generálása: azonos eloszlású, 0 várhatóértékű, független, véletlenértékek sorozataként állítható elő.

```
% fehérzaj (white noise) előállítása
fs=8000;           % alaphfrekvencia
t=2;               % időtartam (a jel hossza)
x=0.2*randn(t*fs,1);
sound(x,fs)
```

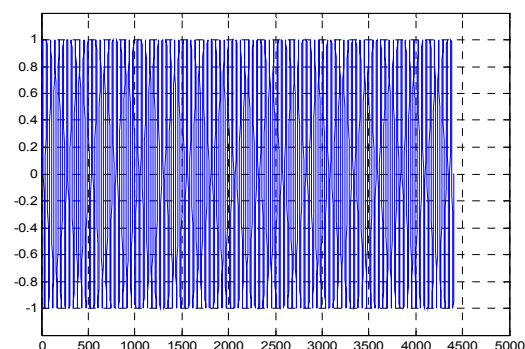


6.ábra Fehérzaj

4.2.2. 1000 Hz impulzus jel

A késleltetési idő mérése miatt fontos generálni ezt a jelet, hossza nagyon rövid, 0.1 secundum, ez a visszaverődések ésinterferenciák miatt lényeges:

```
% 1000 Hz impulzus
Fs = 44100; % Samples per second
fr=1000;
toneFreq = fr; % Tone frequency, in Hertz
nSeconds = .1; % Duration of the sound
y=sin(linspace(0,nSeconds*toneFreq*2*pi,round(nSeconds*Fs)));
sound(y,Fs); % Play sound at sampling rate Fs
```

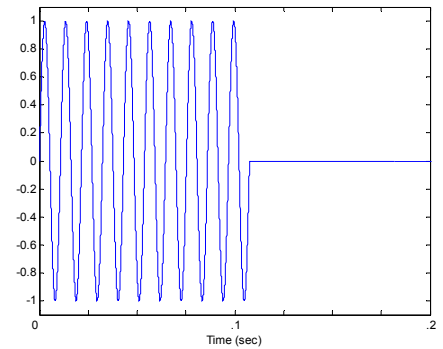


7.ábra 0.1 sec –os 1000Hz-es mérőjel

4.2.3. Burst jel

Sinusos jeleket un. burst jeleket fogok használni a visszaverődések, és a szoba rezonanciafrekvenciájának megállapítására. Az elkészített minták 40 Hz, 50 Hz, 60 Hz, 70 Hz, 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz.

```
% Burst jel előállítás (Frekvencia 100 Hz t=1)
Fs = 44100;          % Mintavételi frekvencia
fr=100;
toneFreq = fr;       % Generálandó hang frekvenciája, Hertz
nSeconds = .1;       % Időtartam
y = sin(linspace(0,nSeconds*toneFreq*2*pi,round(nSeconds*Fs)));
ti=zeros(1,(nSeconds*Fs),'double');
d=[y ti];
wavwrite(d,Fs,16,'sinebursts100Hz.wav')
% Jel mentése 16-bit, 44,1 kHz signal
plot(d)
```

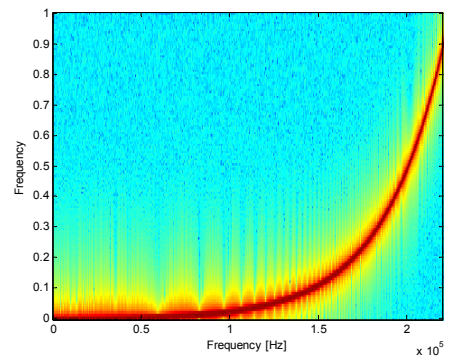


8. ábra 100Hz-es Burst jel

4.3. Teljes spektrum előállítása

A meghallgató helyiség teljes frekvencia menetét is meg kell vizsgálni, mivel csak ennek ismeretében lehet majd meghatározni a szoba rezonancia-frekvenciáját. Ez a frekvencia fontos paraméter lesz a beállításoknál, mivel ennek közelében mért adatok nagy valószínűséggel interferálhatnak, és ezáltal befolyásolják a tér akusztikáját.

```
% Frekvencia spectrum generálása (30Hz-20kHz ig)
fs = 44100;
t = 0:1/fs:10;
a = (log(20000)-log(30))/10;
b = log(30);
x = .8*sin(2*pi*exp(a*t+b)/a); %sin(2*pi*exp(a*t+b)/c);
wavwrite(x,fs,16,'samp_30_20k.wav');
[x fs]=wavread('samp_30_20k.wav');
specgram(x,512,fs/2,hamming(500),400);
```

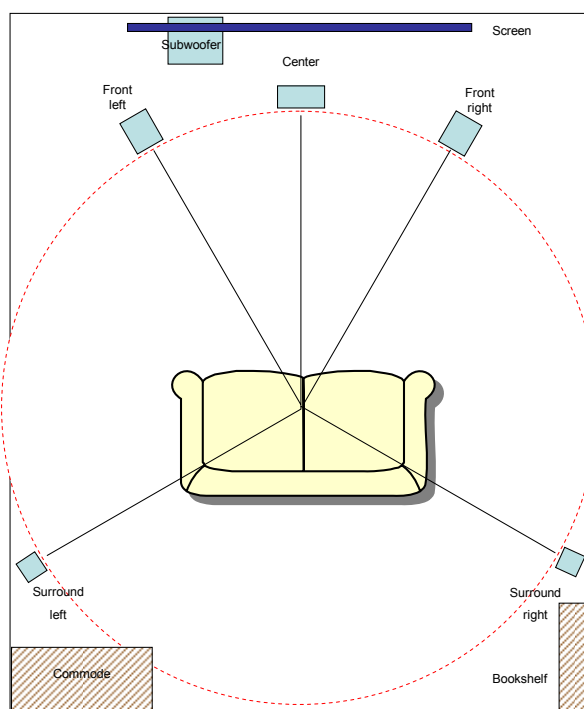


9. ábra Spectrogram (30Hz-20KHz)

5. A kalibráció folyamata

Miután az előzőekben leírt különböző mérőjelek generálása megtörtént a szállíthatóság, reprodukálhatóság és az egyszerűbb használat miatt minden generált jel egy-egy wav file-ba lett elmentve.

A meghallgató helyiség egy házi-mozizásra alkalmas szoba, ami a méretei miatt is ideálisnak tekinthető, (4,70m x 3,90m), ezen kívül a berendezési tárgyak úgy lett megválogatva, hogy a szoba megfelelően legyen csillapítva.



10.ábra Az 5.1 rendszer elrendezése a vizsgálat alatt

5.1. A hangerő beállítása

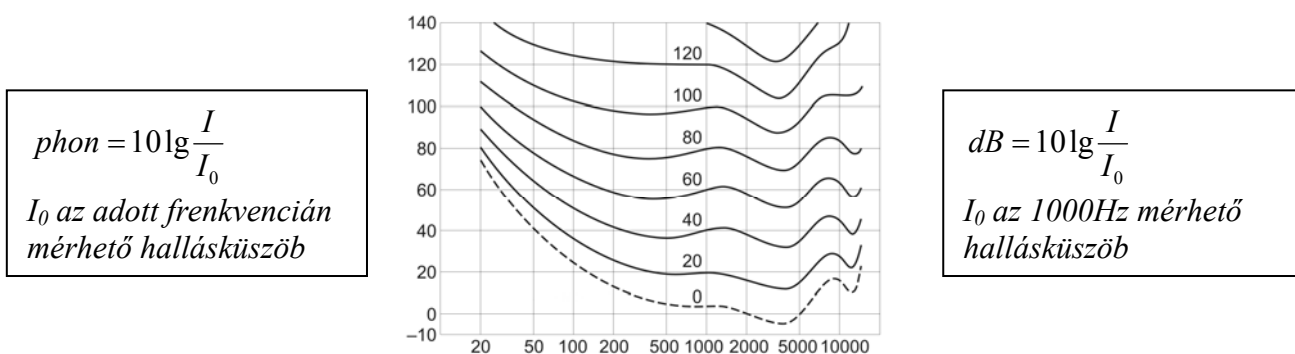
A rendszer paramétereinek beállítását a hangsugárzók hangerejének kalibrálásával kell kezdeni. Erre több módszer is kínálkozik. Először próbáljuk meg beállítani valamilyen szinuszos jellel, a tönb kitüntetett frekvencia közül is válasszuk. Az egyik alap frkevencia, a 440Hz-es normál A hang, jó lehet, de ugyan ilyen jónak ígérkezik az 1000Hz-es jel is, amaly a phon skála miatt kitüntetett.

A *Weber-Fechner-féle* „törvény” szerint, a hangosság a hangintenzitás logaritmikus függvénye, ebből következik, hogy a decibelben mért hangnyomásszint egy adott frekvencián

megegyezik az érzékelt hangosságszinttel. Az így kapott skálát phon-skálának nevezik, ezen a módon a phon használható a hangosság mértékegységeként.

A hangosság érzékelése szignifikánsan függ a frekvenciától. Tiszta, szinuszos hang esetén az emberi fül érzékenysége a legalacsonyabb hallható frekvenciától az 1000...5000 Hz-es tartományig folytonosan növekszik, majd utána újra csökken.

Hallásküszöbnek nevezzük azt a legkisebb hangnyomást, amelyet füllel még éppen érzékelni tudunk, Ezt az úgynevezett egyenlő hangosságú görbékén vagy phon-görbékén ábrázolhatjuk. Definíció szerint a phon és a decibel érték 1000 Hz-en megegyezik, másutt a görbékről olvasható le.



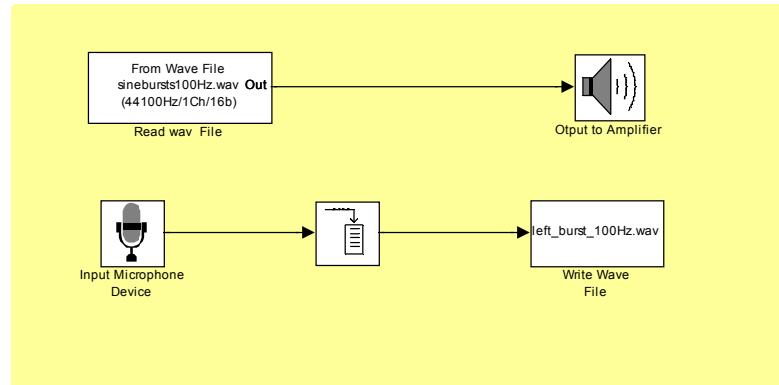
11. ábra Phone görbék

Az eredmények azt mutatták, hogy sem a 440Hz-es sem az 1000Hz-es szinusz jellel nem lehetett megfelelően módon beállítani a hangerőt. Mivel ha a megszólalás időtartama túl rövid volt, akkor, kevés a jel a beállításhoz, ha pedig túl hosszú, akkor interferenciák léphettek fel, a helyiség adottságai miatt. Amiket majd a későbbi burst méréseknél látni fogunk.

Tehát, az előzőekben leírtak alapján keresetem egy olyan jelet, amelynek a spektruma konstans és könnyen előállítható, széles frekvencia-tartományú gerjesztésnek felel meg, de sokkal nagyobb a teljesítménysűrűsége, mint az impulzusos gerjesztésnek, ez lett a fehérzaj, amely nagyon sok jel összegeként áll elő, és a szoba akusztikája sem befolyásolja, mert az interferenciák vagy nem jönnek létre, vagy nagyon rövid ideig tartanak.

A 12. ábrán látható az a MATLAB Simulink eljárás, amely egyszerre indítja a hangfile lejátszását, és a lejátszott jel felvételét. Lehetőség van az indítás késleltetésére is, de esetemben erre nem volt szükség. A felvételnél a mintavétel pontossága és a torzítások elkerülése miatt a rögzítési ágba egy buffert is beépítettem. A felvett jel minősége CD szabványnak megfelelő kódolással lett rögzítve wav formátumban, amely hagyományos

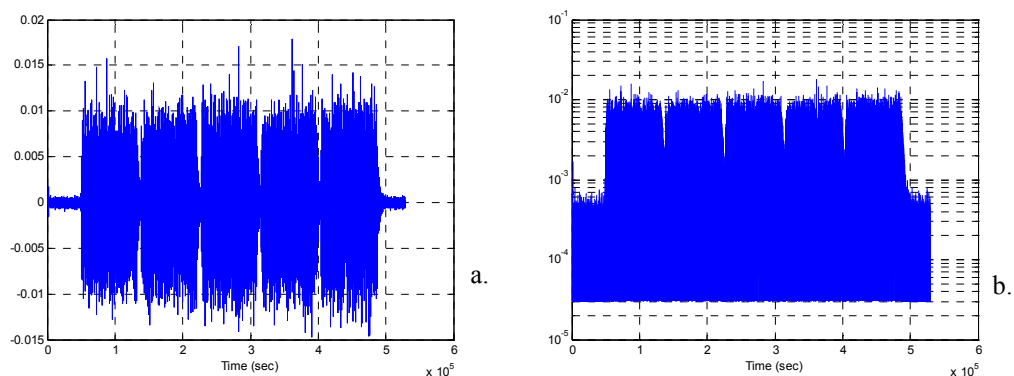
típusú PCM kódolású tömörítetlen hanganyagot tárol, ami azt jelenti, hogy 44100Hz a mintavételi frekvencia és 16 bites formátum.



12.ábra MATLAB Simulink programmal lejátszott és felvett hang

A mérés addig lett ismételve hangsugárzóként (kivéve az aktív mélysugárzón), amíg el nem értem a megfelelő, azonos amplitúdójú szinteket. A mérést sajnos real-time-ban nem lehetett elvégezni, mivel a laptop erőforrásai csak kevés ideig, vagy egyáltalán nem voltak képesek követni a szimultán lejátszás és felvétel lejátszását, rögzítését, és megjelenítését. Ezért a második laptop is igénybe lett véve, csak a mérés megjelenítésre. Így a beállítás viszonylag sokáig tartott, mivel erősítőkön külön külön lett beállítva minden csatorna hangereje. Viszont itt még semmilyen információnk nincs a késleltetési időkről, és a szoba rezonancia frekvenciájáról

A beállítás eredményeként kapott görbe a következő:



13. ábra Fehérzaj (a.frekvencia görbe, b.magnitúdó)

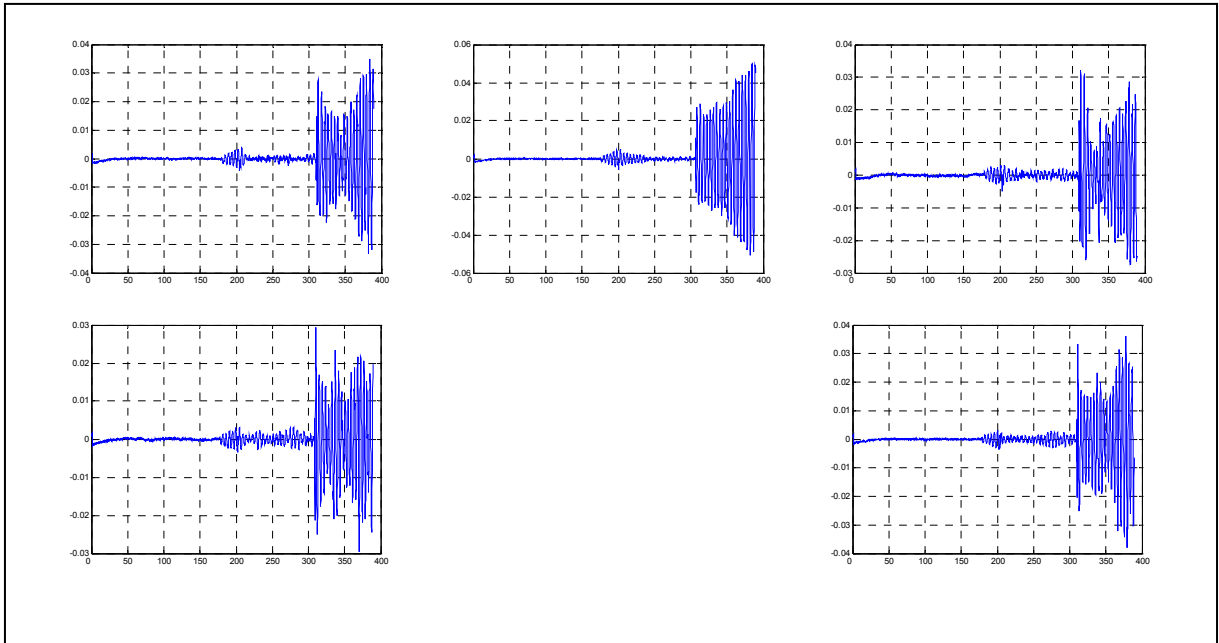
A 13.a. és b.ábrán balról jobbra haladva a következő csatornák értékei láthatóak. Bal első, Center, Jobb első, Bal surround és Jobb surround. Megfigyelhető, hogy a magnitúdók teljesen

egyforma szintűek. Az első beállításnál, látható, hogy a subwoofer adatai nem szerepelnek a mérések között, mivel elsősorban az öt hangsugárzó kalibrációját kívánom megoldani, és azt követően illeszteni a mélysugárzót. Látható, hogy a fehérzaj elég jó a hangerő beállításhoz, viszont megfelelő mérő berendezésre van szükség. A rendszer otthoni beállításnál, ezek a műszerek nem állnak rendelkezésre. Hallásra pedig nem lehet tizedes pontosságú beállítást végrehajtani.

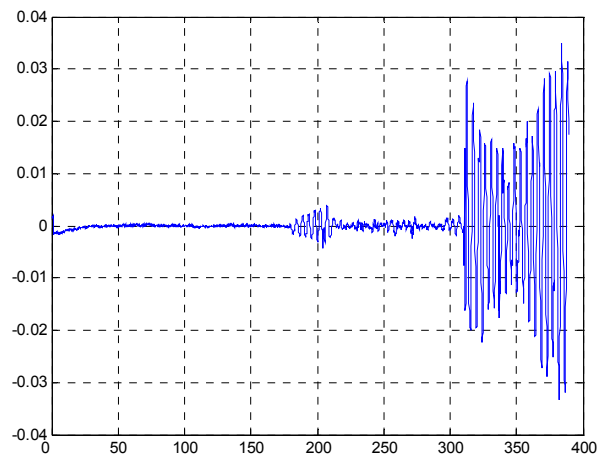
5.2. Késleltetési idő beállítása

Méréseimet, a késleltetési idő (delay-time), meghatározásával folytatom, a méréséhez az előzőekben leírt simulink programot használtam.

Az azonos távolságú elhelyezés miatt a különböző csatornáknak jelen esetben azonos késleltetéssel kell, hogy a válaszaik megjelenjenek a grafikonon. Ehhez a méréshez egy 0.1 sec hosszúságú 1000 Hz-es impulzus jelet használtam, mivel egy rövid impulzus *Fourier* transzformáltja egy minden frekvencián egyenletes gerjesztés. A módszernél vigyázni kell arra, hogy a gerjesztő impulzus amplitúdója nem lehet túl nagy, mivel ez nemlineáris effektusokat hozna létre, így a gerjesztés teljesítménysűrűsége gyakran túlságosan alacsony lenne, ami rossz jel/zaj viszonyú méréseket eredményezhet, ez a visszaverődések miatt lényeges. A mérés értékelésénél a grafikonról lehet majd leolvasni a válszjel megjelenését, mégpedig úgy, hogy a kibocsájtástól számítva hány mérőfrekvencia impulzus telik el, mert a lejátszott és a felvett jel mintavételi frekvenciája is 44100Hz-es.



14. ábra A hangsugárzók válaszjelei



15. ábra A baloldali hangsugárzó jele kinagyítva

Mivel az ITU-R BS.775–1 szabványnak megfelelően lett beállítva a mérési pont és a hangsugárzók, a köztük lévő távolságot a szoba adottságai miatt 2,4 méterben határoztam meg. A 15. ábrán látható módon ábrázolom a kapott jelet, erről leolvasható a késleltetési frame szám. A kapott érték szerint, az egyszerre indított lejátszás és rögzítés között 310 frame van.

Kiszámolható, hogy ez időben mit jelent:

Há 1 sec 44100 frame, akkor

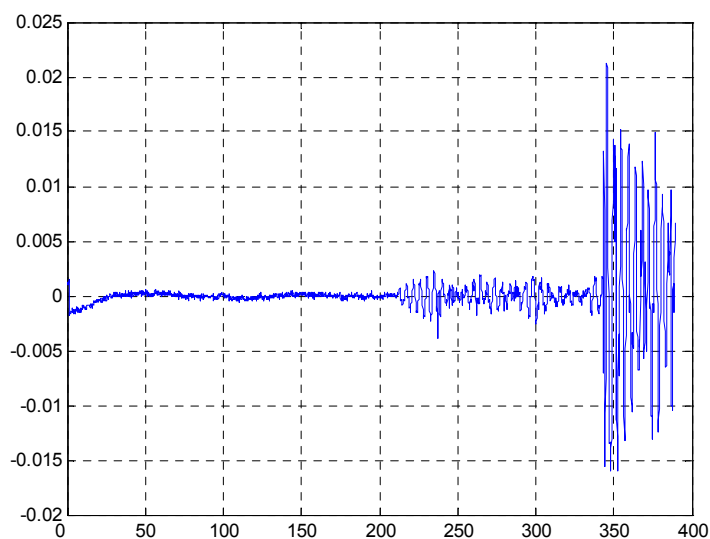
$$t_{delay} = \frac{frame}{44100Hz}$$

$$\frac{310}{44100Hz} = 0.007029 \text{ sec}$$

Tehát eredményül azt kaptam:

$$s = 344m/s * 0,007s = 2,408m$$

A méréseim alapján azt kaptam, hogy a hangszugárzók 2,4 méterre vannak a mérőmikrofontól amit az elhelyezésnél már említettem. Tehát méréssel igazolható a beállítás adatai.



19. ábra Az egyik hangszugárzót 0,3 m-rel hátrébb helyezve

Ellenőrzésként 0,3 méterrel hátrébb helyeztem a bal első hangszugárzót, (19. ábra) és 344 frame-t kaptam válaszként. Az előző számítást újra elvégezve,

$$\frac{344}{44100Hz} = 0.0078 \text{ sec}$$

A számolt távolság pedig:

$$s = 344m / s * 0,0078s = 2,68m$$

A valós életben és az olcsóbb kategóriájú erősítőkön ilyen finom beállításokra nem nagyon van lehetőség, legöbbször csak század másodpercnyi késleltetéseket lehet állítani, ezt a méréseim eredményeként korrigálni lehet, azzal, hogy a hangsugárzókat annyira mozdítom el a helyzetükből, hogy az értékek a lépésközi változás közelébe kerüljenek.

5.2.1. Beállítási problémák:

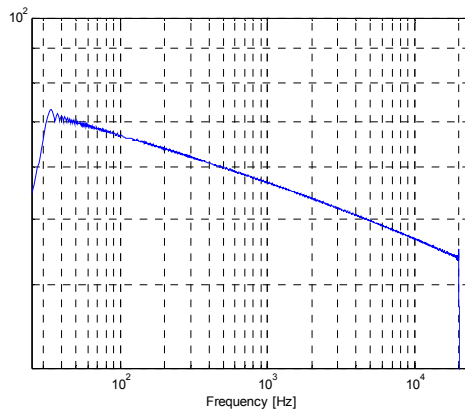
Nagyon nehéz eldönteni, hogy melyik hangszóró legyen a kalibráció alapja, de mindenképpen csak a két frontsugárzó közül választható ki, mert ezek a legszélesebb spektrummal és legnagyobb dinamikával rendelkezők (az ajánlások miatt). Fontosságuk abban rejlik, hogy ha stereo lejátszásra használjuk rendszert, akkor csak ezek szólalnak meg, viszont a stereo reprodukciónál még sokkal fontosabb a megfelelő elhelyezés. Mert két hangszórónak kell a háromdimenziós teret kialakítani. Ezért megnő annak a jelentősége, hogy ha a lejátszásnál nem lesz megfelelő a beállított késleltetés. Legfontosabb valójában, az lenne, hogy a legalább ez a két hangszóró legyen egyenlő távolságra a meghallgatási ponttól. A bevezetőben leírtak miatt a késleltetés beállítása nagyon fontos, de egyben frekvencia függő is. Ezt a függőséget nem lehet áthidalni.

6. Frekvenci menet mérése

A következő lépésben megvizsgálom a szoba frekvenciamenetét. A méréshez 30Hz-től 20000Hz-ig tartó jelet fogok használni.

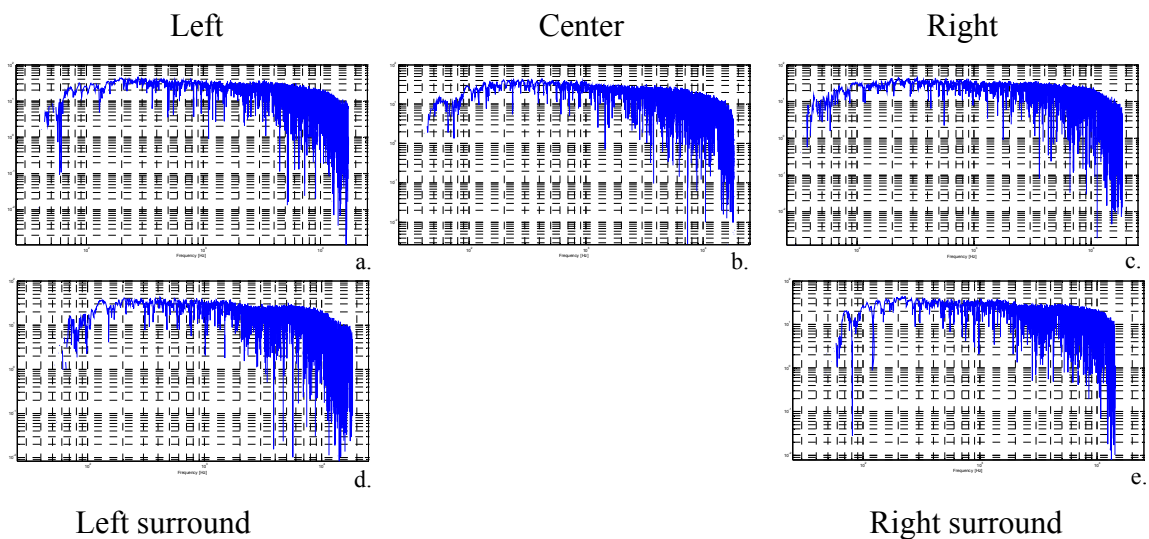
% Frekvencia menet megjelenítése (30Hz-20kHz ig

```
[y Fs]=wavread('E:\sample_mod\samp_left.wav');
[S f]=freqz(y,1,44100,Fs);
mag = 20*log10(abs(S));
loglog(f,mag),grid;
axis([25 200 0 100]);
xlabel('Frequency [Hz]')
```



20. ábra Frekvencia menet 30Hz-20000Hz-ig

Feltételezésem szerint a kalibrációs görbéket nagyban befolyásolja a hallgató helyiség akusztikája. Ezért meg lett mérve az 5 hangszóró frekvencia menete a szobában. A különböző csatornákon mért görbék összegéből adaptív szűrő segítségével próbálom meghatározhatózni a szoba rezonancia frekvenciáját.



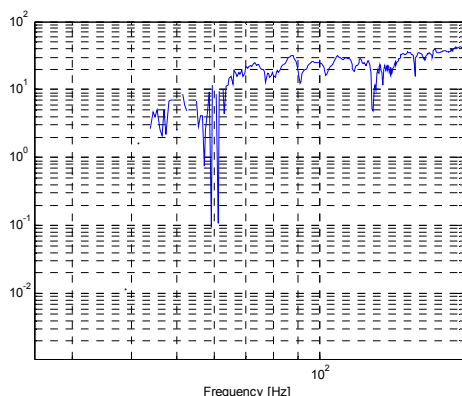
21. ábra A mért frekvencia menetek

Ismert, hogy a két front sugárzó (20. a.,c. ábra) közel azonos frekvencia menettel rendelkezik, amit az 5. ábrán láthatunk (gyári mérés görbéje). A két surround és a center (20. b., d.,e. ábra.) azonos gyártótól való, és a hangszóró készletük is azonos, tehát feltételezhető, hogy frekvencia átviteli görbéik is hasonlóak.

A teljes 30Hz-20000Hz tartományt felölelő jellel készült mérésekből még számunkra ideálisnak tűnő esetben, mint amilyen a mérő szoba elrendezésem 10. ábra.

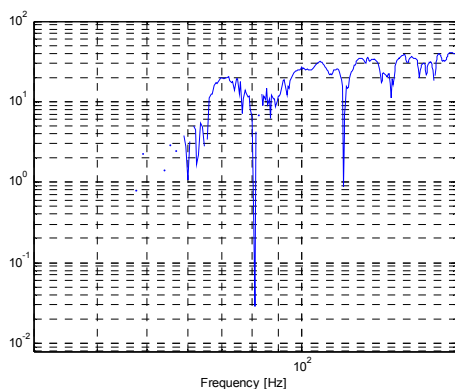
Látható, hogy a mért spektrumok lefutása közel azonosnak tekinthető, de jobban megvizsgálva, az alacsonyabb frekvenciákon találunk néhány különbséget. Ezt igazolni látszik, azt a feltételezést, hogy a szoba akusztikája is befolyásolhatja a standard kalibrációt.

A baloldali front sugárzónál (20.a. ábra), egy szignifikáns beszakadás jelenik meg 60Hz



21. ábra 60 Hz-es beszakadás

környékén, először mérési hibának gondoltam, de többszöri mérés esetén is mindig azon a helyen jelent meg, ezért mást kezdtem vizsgálni. A hangsugárzó átviteli hibájára gyanakodtam, de a jobb és baloldali hangfalakat megcserélve is szintén 60Hz (21. ábra) környékén jelentkezett, ugyanezen a helyen a beszakadás, ebből arra következtettem, hogy ez a jelenség a szoba akusztikai paraméterére jellemző tényező. További vizsgálatokat folytatva, a hangsugárzót teljesen rátoltam a falra, a görbéről eltűnt a beszakadás. A 10. ábrán látható elrendezésnél, igaz nincs jelölve, de baloldali hangsugárzó mellett van egy ajtó nélküli bejárat a szobába. Tehát amit látunk a görbén az a külső helység hatása a frekvencia menetre. Itt kell megjegyezni, hogy ajánlani szokták, hogy ha lehet, szimmetrikusan kerüljenek elhelyezésre és kerülendő a nagyon üres térbe, vagy teljesen a sarokba rakás.

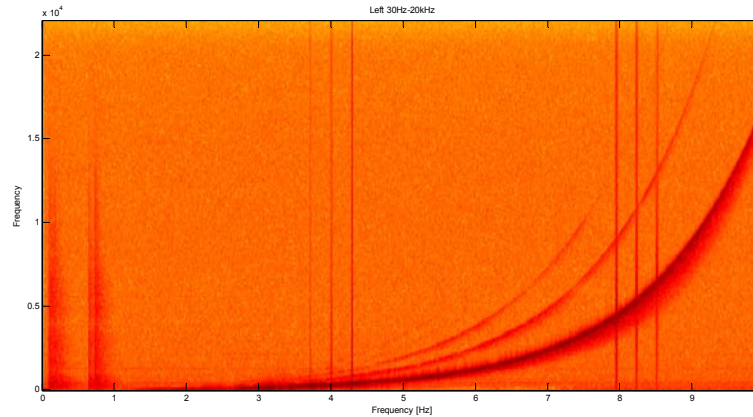


22. ábra A polc hatása a hangzásra

A vizsgálódást folytatva, egy másik ilyen beszakadást is találtam a jobb surround hangsugárzó (20.e. ábra) spectrumában 80Hz-nél és egy másikat 120Hz-nél ezek az elrendezéseknél látható polc miatt jelentek meg a spectrumban (22. ábra). Próbaképpen áthelyeztem az ideális távolság betartásával a hangsugárzót, és a másik surround sugárzóval ekvivalens görbét kaptam. Ezeknek az eredményeknek a teljes rendszer használatánál is befolyással kell lenniük a hangképre.

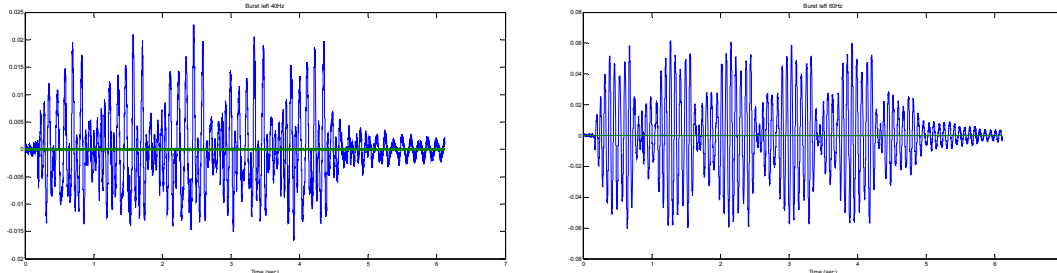
6.1. Akusztikai viselkedés

Először megpróbálom a definiált burst jelekkel megvizsgálni a visszaverődéseket. Emlékeztetőül a burst jeleim 0.1 sec jel 0.1 sec csend, ez tart tíz secundum-ig. Ez a hosszúság már elég lehet interferenciára vagy állóhullámok kialakulására.



23.ábra A baloldali első hangszóró Spectrogramja

A mérésekhez több próba frekvenciát generáltam (20Hz, 21Hz, 25Hz, 30Hz, 35Hz, 40Hz....egészen 200Hz-ig). Ebből a 40Hz alattiakkal nem volt értelme foglalkozni, mert az előző mérések alapján láthatóvá vált, hogy ott nagy a hibaszázaléka a mérésnek, ráadásul a center- és háttérzárók 70Hz-nél érik el a -6dB-es pontot. Ezért a következő burst jeleket használtam 40Hz, 50Hz, 60Hz, 70Hz, 100Hz, 150Hz és 200Hz. Minden hangsugárzón végrehajtva a méréseket, a 70Hz-ig egyre csillapodó interferenciákat tapasztaltam, ez valószínűleg a szoba visszhangosságából és enyhe csillapításából ered.



24.ábra A baloldali első hangszóró 40Hz-es és 60Hz-es burst válasza

Azért választottam ezt a két grafikont, mert a bal oldalin éppen kivehető még a burst válasz, de olyan mintha nem tudna teljesen lecsillapodni. A problémásabb a másik grafikon a 60Hz-es burst itt már mjad nem teljesen jók a burst válaszok, de ami ennél is jobban feltűnik, hogy

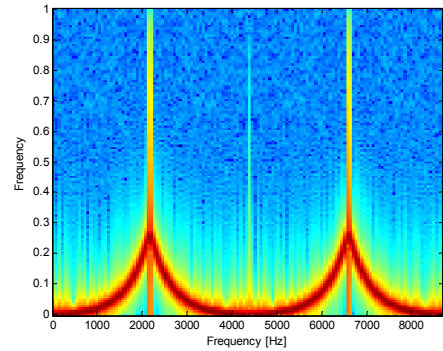
öt gerjesztésre hat burst jel figyelhető meg. A hatodik kisebb amplitúdójú, gerjesztett jel. Szerencsére csak ezen a frekvencián jelent meg, és csak ezen a hangsugárzón jelent meg. Ez összefüggésben lehet a frekvencia menetnél történő beszakadással is.

Következő lépésben próbáljuk meghatározni szoba akusztikai viselkedését a 30Hz és a 3000Hz közötti tartományban, azért ebben a sávban, mert ez az átviteli frekvencia alsó határa alól indul és a kétutas hangsugárók átlagos keresztezési frekvenciájáig tart. Így nagyrészt a mély-közép hangsugárzó jelét mérem, és az előző mérésekből megállapíthattam, hogy a szoba akusztika főként itt érvényesül.

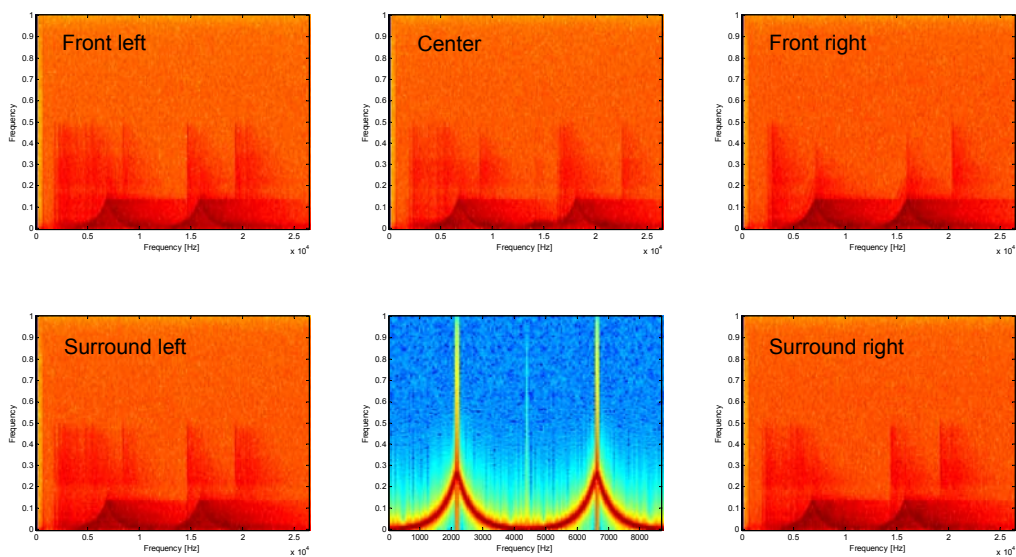
Generálok egy mérőjelet, amely az először emelkedik 3000 Hz-ig, majd lecsökken a kezdeti 30Hz-re ezt a ciklust ismétlem meg még egyszer. Ez egy viszonylag rövid ideig tartó jel, amely miatt nem alakulhat ki állóhullám, és tartalmazza a feltételezett rezonancia-frekvencia értéket is.

% Frekvencia menet generálása (30Hz-3kHz-ig)

```
fs = 22050;
t = 0:1/fs:.2;
a = (log(3000)-log(30))/t(end);
b = log(30);
x = .8*sin(2*pi*exp(a*t+b)/a);
x=[x x(end:-1:1)];
x=[x x(end:-1:1)];
sound(x,fs);
wavwrite(x,fs,16,'skala.wav');
```



23. ábra Mérőjel 30-3000Hz váltakozó



25. ábra A mérőjelre kapott válaszok a különböző csatornákból

A válaszjelekből látható, hogy a szoba minimális visszhanggal rendelkezik.

A hangtechnikával foglalkozó szakirodalom az alsóbb frekvenciákra 50Hz és 200Hz közé teszi a szobák rezonancia frekvenciáját.

6.2. Adaptív szűrő

A további mérésekhez szükségem lesz egy digitális szűrőre. A választható szűrők közül az adaptív szűrési algoritmust választottam, mert lehetővé teszi a külső jelenségek modellezését, és adaptív szűrést lehet használni különböző az elemzésekre és a rendszer szintézisének beállítására.

A digitális szűrés feladata az lesz, hogy az eredeti generált jelet összehasonlítsa a méréseken kapott jelekkel.

A legkisebb átlagos négyzetes vagy lineáris minimális varianciájú (LMS) algoritmusszűrők rendelkeznek viszonylag egyszerűen megvalósítható szűrők közé tartozik, és megfelelően hatékony eszköz lehet egy probléma megoldására a meglévő adatok értékelésével.

Egy közös alkalmazás használatával az adaptív szűrővel azonosítani lehet egy ismeretlen rendszer, mint a válasz egy ismeretlen frekvencia egy helyiségben.

Jelölések:

Szűrő bemeneti és kimeneti jelei: $x(k)$ és $y(k)$

Kívánt vagy alapjelet: $d(k)$

Hibajel: $e(k) = d(k) - y(k)$

Nyilvánvaló, ha $e(k)$ nagyon kicsi, az adaptív szűrő válasza közel van a az ismeretlen rendszerhez. Ebben az esetben ugyanazt a bemenetet táplálja mind a adaptív szűrő mind az ismeretlen jel.

A hibajel segítségével módosítható és az együtthatók segítségével módosítható az adaptív szűrő.

Néha az adaptív rendszer nem konvergál a kívánt jelhez, ez akkor fordulhat elő, ha a bemeneti jel amplitúdója széles körben változik.

Ezt az amplitúdó-függőséget is lehet kezelni, bevezetve a bemeneti amplitúdó korrekciós tényező. Erre használható az úgynevezett normalizált LMS-algoritmus.

Az LMS-algoritmus, vagy *Widrow-Hoff* tanulási algoritmus alapja egy meredeken közelítő eljárás. Az átlagos négyzetes hiba segítségével tudunk megbecsülni, minden iterációt.

A következő képpen:

$$y(k) = \hat{w}^H(k-1)x(k)$$

$$e(k) = d(k) - y(k)$$

$$\hat{w}(k) = \hat{w}(k-1) + \frac{u(k)}{a + x^H(k)x(k)} \mu e^*(k)$$

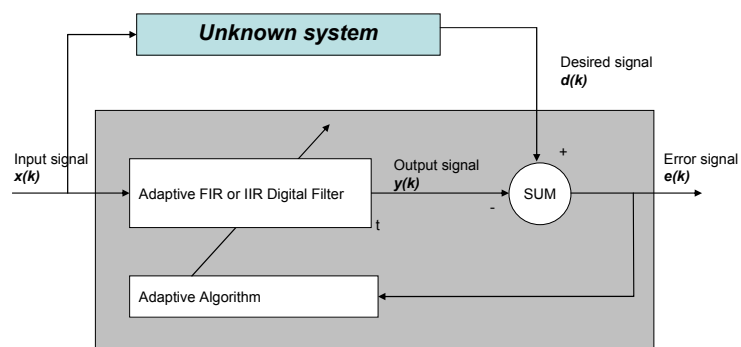
Normalizálás után:

$$\hat{w}(k) = \hat{w}(k-1) + u(k) \mu e^*(k)$$

Ahol a változók elnevezése a következő:

- k az algoritmus iterációinak száma
 $x(k)$ a pufferezt bemeneti minta
 $\hat{w}(k)$ a szűrő becslésvektora k fokszámú
 $y(k)$ a szűrt jel
 $d(k)$ a kívánt jel
 μ a korrekció mértéke

A 21. ábrán, az ismeretlen rendszer kerül párhuzamosan az eredeti jellel az adaptív szűrőre.

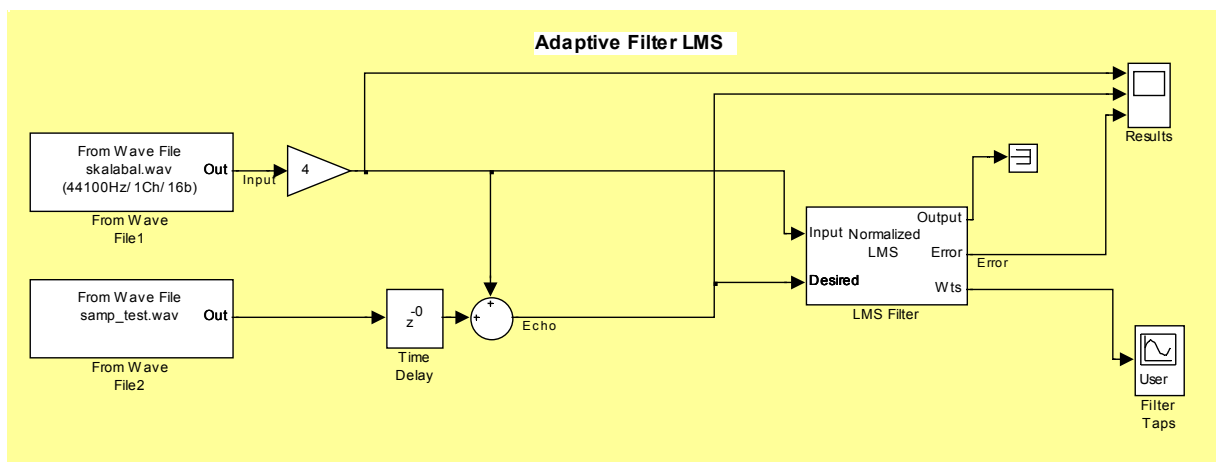


$$e(k) = d(k) - y(k) \text{ (hiba jel)}$$

$$y(k) = \text{Filter}\{x(k), w(k)\}$$

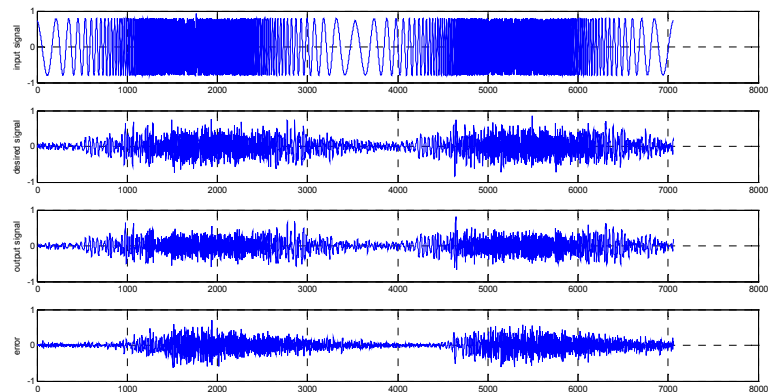
$$w(k+1) = w(k) + e(k) f\{d(k), x(k)\}$$

26. ábra Adaptív szűrő blokk vázlatja



27. ábra MATLAB Simulink programban megvalósított LMS szűrő

7. Az adaptív szűrés eredményei



28. ábra A adaptív szűrő válasz görbéi a (30Hz-3000Hz)

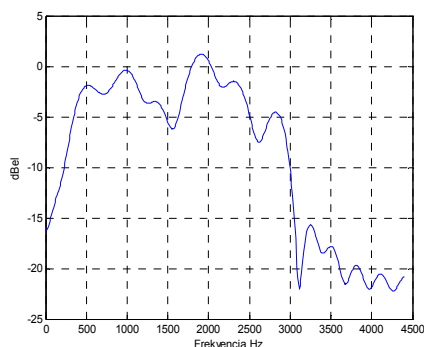
% az adaptív szűrést végző program

```
[d fs]=wavread('E:\DIPLprg\30_300_ablak\test_33_lm.wav');
n=length(x);
yy=d(5001:5000+n);
xyy=xcorr(x,yy);
[m,k]=max(xyy(n:n+1000)./((n:-2:n-2000).'));
k=k-100;
yy=d(5000+k:5000+k+n-1);

mu = 0.08; % LMS step size
h = adaptfilt.lms(32,mu);
[y,e] = filter(h,x,yy);

[H f]=freqz(h.Coefficients,1,500,fs); % a pillanatnyi együtthatók értékeinek megállapítása
H=20*log10(abs(H)+eps); % áttérés dB skálára
plot(f,H);grid;
xlabel('Frekvencia Hz');
ylabel('dBel');
```

Az adaptív szűrőnél az input jelet hasonlítom össze a mért jellel, a 28. ábrán látható, hogy az



29. ábra Az adaptív szűrő karakterisztikája

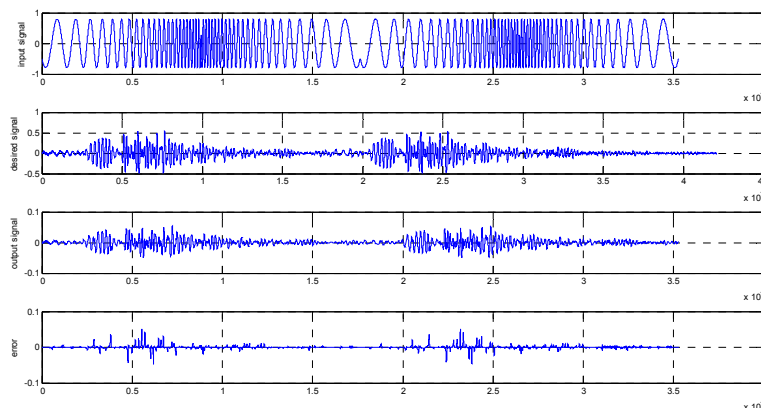
mért és a szűrő kimeneti jele hasonló, de meghatározó kiemelkedés nem tapasztalható, tehát a szoba rezonancia frekvenciájára vonatkozóan nincs adat. Ez nagy valószínűséggel a 25. ábrán is látható visszhanggal magyarázható, amely megzavarja az adaptív szűrő működését.

Megvizsgálva a mérés spektrumát, több frekvencián is látható csúcs. De 1900Hz-en látható a legnagyobb,

amplitúdó, viszont ez nem lehet a szoba alap frekvenciája.

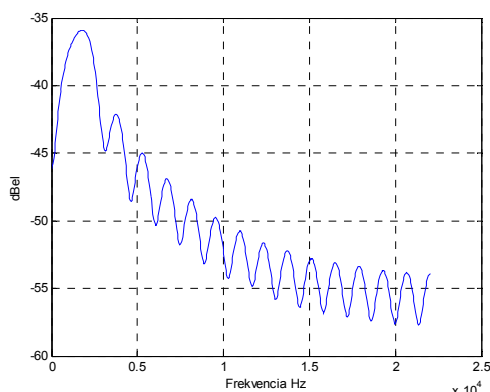
Megpróbálom szűkíteni a mérés frekvencia tartományát és új mérő impulzust generálok, amely csak 30Hz-től 300Hz-ig megy, a formája olyan, mint az előzőé, először emelkedik 300

Hz-ig, majd lecsökken a kezdeti 30Hz-re és ezt ismétlődik még egyszer, és valószínű, hogy tartalmazza a feltételezett rezonancia-frekvencia értéket is.



30. ábra A adaptív szűrő válasz görbéi a (30Hz-300Hz)

Ezzel a szűkebb frekvencia tartománnyal rendelkező mérőjellel, már egy sokkal



31. ábra Az adaptív szűrő karakterisztikája

jobban értékelhető eredményt kaptam. Az adaptív szűrő által előállított válaszjel jobban közelít az elvártnak, és a hiba is sokkal kisebb, és jól meghatározott pontokon találhatóak tüskék. A mérés spectrumot ábrázolva már csak egyetlen szignifikáns csúcsot találok (31. ábra), amely valószínűleg a keresett rezonancia frekvencia.

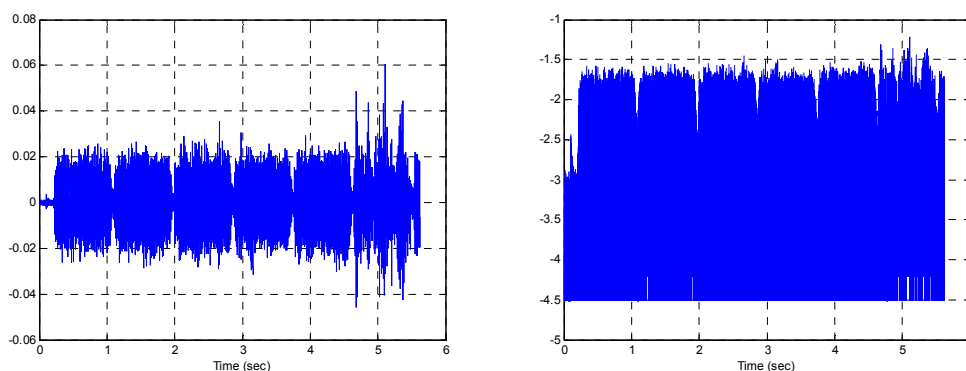
Ezekből a mérésekből is látható, hogy egyetlen mérőjellel nem lehet minden beállítási paramétert megmérni, szükséges többféle frekvenciájú, és spectrummal rendelkező mérőjel. Ezeket a méréseket egy egyszerű felhasználó nem fogja elvégezni, de őt nem is ez érdekli, hanem, hogy a megvásárolt rendszere a lehető legjobb tér-leképezési reprodukcióval rendelkezzen. Hangsúlyozni szeretném, hogy ezekkel a mérésekkel nem áll szándékomban a beépített kalibrációs rendszereket minősítése.

A subwoofer hozzáadása a rendszerhez

Most vissza kell térnem a hangerő beállítása fejezetben leírtakhoz, a hangerősség beállításához. Mivel az eddig leírtak alapján ismerjük az 5 hangsugárzó frekvencia menetét, hangerejét és késleltetési idejét, ezekhez a paraméterekhez kell illeszteni a hatodik, a mélyhangsugárzót. Az eddig beállított rendszer rendelkezik, mélytartománnyal, de a 21. ábra frekvencia menetei alapján is látszik, hogy 100Hz alatt még a frontsugárzók frekvencia menete is esik. A Dolby Digital 5.1-gyel és a DTS-sel kódolt filmek izgalmát általában akusztikusan szokták fokozni, legtöbbször a mély hangok kiemelésével, dinamika növelésével. Viszont pont ezek azok az effektusok, hatások, ami miatt a subwoofert jól kell beállítani. Ez az a komponens, ahol a magasabb szintű házimozsi erősítők, csak a kimenő jel hangerősségét tudják emelni vagy csökkenteni, más paraméter módosításába nem tudnak belenyúlni, az olcsóbbak némelyike csak a DVD-ről érkező dekódolt jelet küldi ki.

A subwoofer azért is érdekes, mert a többi hangsugárzóhoz képest önálló életet él, mivel a legtöbb aktív rendszerű, azaz tartalmaz egy beépített erősítőt, és legtöbbször egy szabályozható keresztváltót is. Az otthon mozizók azt az eszközt sokszor túl dimenzionálják, mert szeretik, azt a hatást, hogy a talaj dübörög alattuk (a szomszédok kevésbé). Igaz a kalibrációs folyamat a beállított hangerejét hozzáigazítja a többi egységhez, viszont ezt az esetek nagytöbbségében felülbírálják, pont az előbb említett hatás miatt.

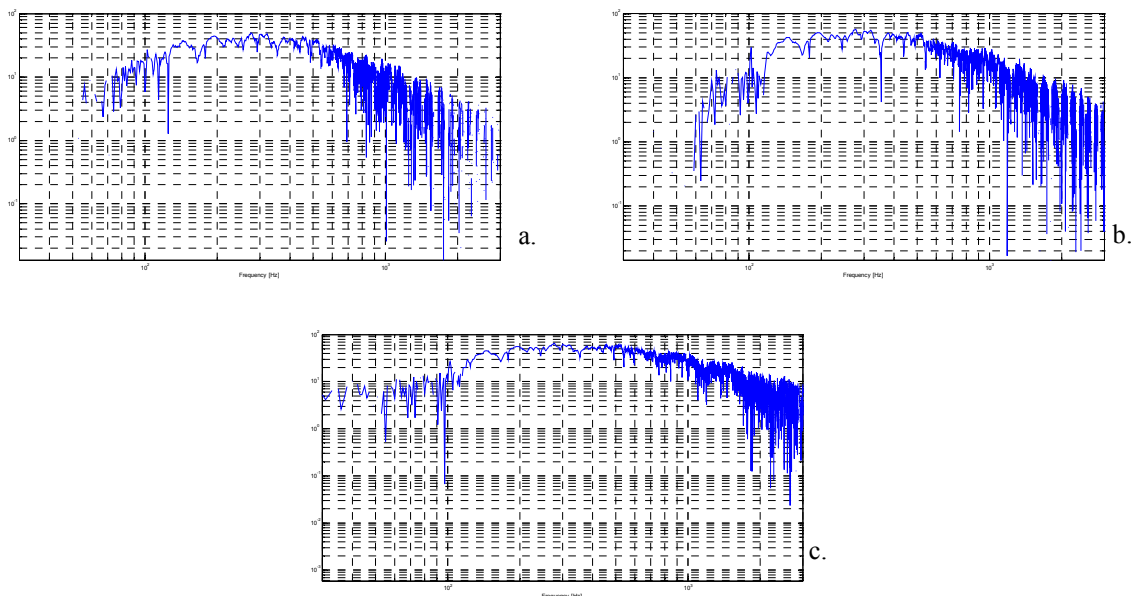
Most visszatérek a generált fehérzajhoz és beállítom a hangerősséget.



28. ábra Fehérzaj a hat csatornán (a. frekvencia görbe, b. magnitúdó)

A méréseken jól látszik, hogy még fehérzaj segítségével is nehéz hozzáigazítani a meglévő 5 hangsugárzóhoz a mélyhangsugárzót, viszont a fehérzaj használata miatt a frekvenciaváltó

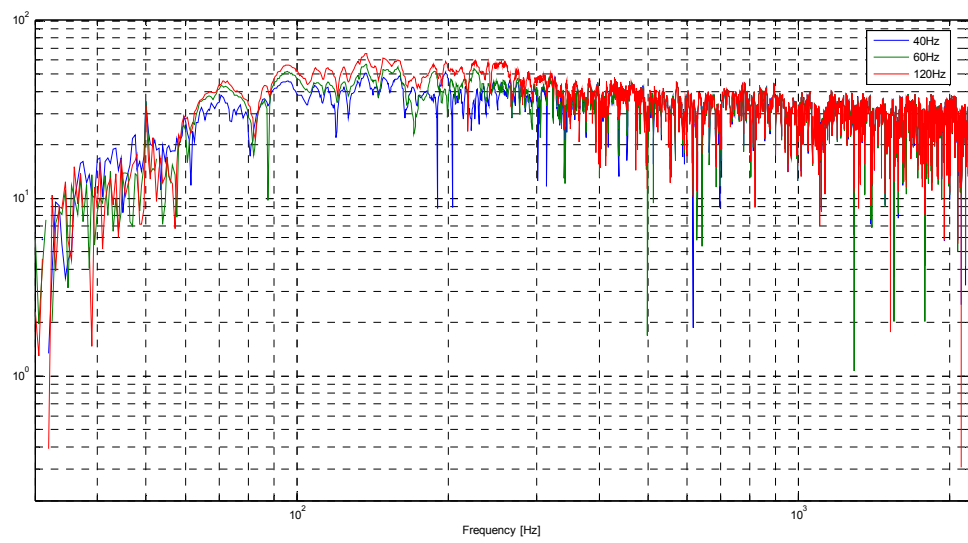
beállítása, a hangerősséget és a magnitúdót nem befolyásolja. Viszont a frekvenciaspectrumot szignifikánsan. Ez az a pont ahol a mért görbéim alapján kiválsztom a legmegfelelőbb keresztváltó beállítást.



29. ábra Frekvencia menet (a. 40Hz , b. 60Hz c.120Hz keresztvezési frekvencia)

Ahhoz, hogy dönteni tudjak, a beállítást illetően elkészítettem az összeg frekvencia meneteket, a 40Hz, 60Hz, és a 120Hz-es keresztvezési frekvenciával. Így sokkal szemléletesebb a három frekvencia menet, Ábrázolásnál 29. ábrán nem a teljes spektrumot ábrázoltam, hanem csak a 30Hz-től 2200Hz-ig tartó részt, mert itt található a legnagyobb hatása a mélysugárzónak.

A görbéket összehasonlítva a legideálisabb a 40Hz-es keresztvezési frekvenciával rendelkező görbe, de ezt a spektrumok a összehasonlításánál 21.a ábrán látott 60Hz-es beszakadás miatt várható volt, hogy vagy a 60Hz-es, vagy az alacsonyabb vágási frekvenciával rendelkező lesz számomra megfelelő. Ez az a paraméter, amit a legkorszerűbb beépített AUDYSSEY Laboratories rendszerek sem tudnak tökéletesen beállítani, mivel az aluláteresztő szűrő beállítását manuálisan kell elvégezni, bármely subwooferen amely rendelkezik ezzel a szolgáltatással.



30. ábra Frekvencia menetek a 40Hz, 60Hz, és 120Hz keresztezési frekvenciákkal

Összefoglalás

A dolgozat folyamán megvizsgáltam a házimozsi-rendszerek installálásánál leginkább előforduló alapproblémákat. Ilyenek az egyenletes hangerősség beállítása, a késletetési idő, és a subwoofer illesztése a többi hangsugárzóhoz.

A MATLAB program segítségével sikerült szimulálni, és mérni azokat a jelenségeket, amelyek egy átlagos nappali szoba keretei között előfordulhatnak.

Áttekintettem a mérésekhez használt eljárások elméleti háttérét, és kisebb programok, eljárások segítségével ellenőriztem az egyes módozatok közötti különbségeket. A mérések sokrétűségéből adódóan valószínűsíthető, hogy a kereskedelemben kapható többcsatornás erősítők, az itt leírt mérések közül, leginkább szoba akusztikájával nem foglalkoznak, nem mérik, ezért fordulhat elő az, hogy jó minőségű részegységek rosszul jelenítik meg a hangokat és effektusokat.

Az elvégzett mérések és feldolgozások tükrében elmondhatom, hogy az 5.1-es rendszerek pontos beállítása még ideális esetben sem egyszerű. A valós lakókörnyezetek, ettől a szimulációhoz használt, ideálisnak mondható beállítástól, nagyban eltérnek. Egy másik vizsgálatot megérne az is, hogy egy általánosan berendezett és a felhasználó által jól beállítottan tartott hangrendszert megmérjek, és összehasonlítsam az eredményeket.

Viszont a kísérletek eredményei rámutatnak arra, hogy tesztelő, és beállító rendszer nélküli készülékeket nem érdemes vásárolni, mert föltre a hangerősség, a késletetési idő, mint paraméterek nem állíthatók be.

A rendszer komponenseinek a késletetési idejeinek beállítása az egyik, valójában, a legfontosabb tényező, de nem az erősítő kalibrációs rendszerével kellene beállítani, hanem ha lehetséges, a hangsórók optimális elhelyezésével, mert a készülékek által használt mérőjelek a szoba akusztikájának függvényében eltérő eredményt adhatnak. Ezért, ha ez nem oldható meg, akkor törekedni kellene arra, hogy a hosszanti tengelyen található, ez alatt értem a front és a surround sugárzók elhelyezését úgy megoldani, hogy páronként azonos távolságra legyenek a hallgató pozíciójától.

A szoba akusztikai hangolására a vizsgálataim idő hiányában nem tértek ki.

Nem foglalkoztam a vetítővászonnal, sem mint csillapító tényezővel, mivel legtöbb esetben ez közvetlenül a center-sugárzó mögött a falon helyezkedik el.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet szeretném kifejezni elsősorban témavezető tanáromnak Dr Papp Zoltán egyetemi adjunktusnak, aki hasznos megjegyzéseivel, segítőkészségével, segítette, koordinálta munkámat, és a digitális beszédfeldolgozás előadás keretében rámutatott erre a számomra különösen érdekes lehetőségre.

Szeretném megköszönni családom minden tagjának, azt a türelmet és segítő biztatást, amit a tanulmányim alatt nyújtottak nekem.

Irodalomjegyzék:

1. Ballou, Glen, Ed., *Handbook for Sound Engineers*, 2nd ed, Howard Sams, Carmel, Indiana, 1991 .
2. Dickason, Vance, *The Loudspeaker Design Cookbook*, 5th ed., Audio Amateur Press, Peterborough NH, 1995.
3. Everest, F. Alton, *The Master Handbook of Acoustics*, 3rd ed., Tab Books, New York, 1994.
4. Fourdraine, J. D., (translator), "Capacitors: Why They Matter," *Speaker Builder*, issue 3, 1996, pp 40-45.
5. Nashif, A. D., Jones, D. I. G., and Henderson, J. P., *Vibration Damping*, Wiley, New York, 1985.
6. Lyons, Richard G., *Understanding Digital Signal Processing*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1997.
7. Toole, Floyd E., "The Acoustics and Psychoacoustics of Loudspeakers and Rooms - The Stereo Past and the Multichannel Future," 109th AES Conv., Los Angeles, Sept 2000.
8. F. Takács, *Hangstúdiótechnika*, Műegyetemi kiadó, 2004.
9. Norbert Hesselmann : *Digitális jelfeldolgozás*, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1985