



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

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

Csepreghy Márton

**SOKCSATORNÁS HANGTÉR-
REPRODUKCIÓS RENDSZER
TERVEZÉSE ÉS
MEGVALÓSÍTÁSA**

KONZULENS

Firtha Gergely

BUDAPEST, 2019

Tartalomjegyzék

| | |
|---|----|
| Összefoglaló | 5 |
| Abstract | 6 |
| 1 Bevezetés | 7 |
| 2 A hangtárszintézis elméleti alapja | 9 |
| 3 A hangtárszintézis rendszerek megvalósítása | 11 |
| 3.1 A megvalósítás problémái:..... | 11 |
| 3.2 A tervezéskor figyelembe vett célok: | 13 |
| 4 Hangtárszintézis rendszer megvalósítására alkalmas hangláda prototípus tervezése | 15 |
| 4.1 Az elektrodinamikus hangszóró dugattyúmodellje, és a TS paraméterek szerepe a tervezésben: | 15 |
| 4.2 A ládaméretezés és a láda formájának szerepe a hangfal karakterisztikájában..... | 18 |
| 4.3 A hangszóró választásának szempontjai:..... | 21 |
| 5 A hangrendszer meghajtására alkalmas erősítőpanel tervezése | 25 |
| 5.1 A tervezés elméleti szempontjai:..... | 25 |
| 5.2 A választott célhardver (Analog Devices SSM3582):..... | 27 |
| 5.3 A tervezett NYHL, és az erősítő funkcionális leírása: | 28 |
| 6 Az erősítő digitális vezérlése..... | 32 |
| 6.1 Az erősítő működtetésének módjai | 32 |
| 6.2 A vezérlőjelek formátuma..... | 33 |
| 6.3 A vezérlőjelek kiadásának programozása a választott célhardverrel | 36 |
| 6.4 A vezérlőjelek mérése..... | 39 |
| 7 Összefoglalás..... | 41 |
| Irodalomjegyzék | 42 |
| Függelék..... | 44 |

| | | |
|----|---|----|
| 1. | Az I2C protokoll elérhető eszközeit listázó program | 44 |
| 2. | Az I2C regisztereket konfiguráló program | 45 |
| 3. | Az I2C regiszterek tartalmát beolvasó program..... | 48 |
| 4. | Az I2S protokollon küldött négyszögjelet generáló program | 49 |

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott **Csepreghy Márton**, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy hitelesített felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Kelt: Budapest, 2019. 05. 17.

.....
Csepreghy Márton

Összefoglaló

A hangrendszerek fejlődése során egyre erősebb igény jelent meg nem csak a hangerősség, de az irányérzet megfelelő reprodukciójára is. Napjaink piacvezető megoldásai javarészt a mozis hangrendszerek otthoni felhasználásra kifejlesztett verziói. Ilyen például a Dolby Stereo, 5.1 és 7.1 rendszer. Ezek közös alapelve, hogy egy fix pont (úgynevezett sweet spot) körül elhelyezett néhány hangszóró megfelelő vezérlésével érik el az adott pontban a kívánt irányérzetet.

Ezek a rendszerek praktikusságuk és olcsóságuk miatt igen elterjedté váltak, a multimédiás tartalmak döntő többsége támogatja őket. Nagy előny továbbá az is, hogy ezek a rendszerek kompatibilisek a régebbi megoldásokkal is.

Hátrány viszont, hogy a hangteret nem reprodukálják fizikailag, ezért a sweet spot-on kívül sehol máshol nem megfelelő az irányérzet.

Erre a problémára nyújt megoldást a hangtérszintézis (Wave Field Synthesis - WFS) módszere. Ez egy egymáshoz közel elhelyezett, kisméretű hangszórókból álló sokelemű rendszer egyidejű, de hangszórónként különböző jelekkel történő vezérlésével a hullámtér fizikai reprodukcióját valósítja meg egy kiterjedt megfigyelési terület mentén.

A hangtérszintézis rendszerek megvalósítására nincs elterjedt megoldás, ugyanis számos problémába ütközik. Különböző szempontok ellentmondó követelményeket támasztanak a tervezés során, így csak kompromisszumos megoldást lehet kivitelezni.

A dolgozat egy hangtérszintézisre alkalmas rendszer tervezését mutatja be. Ismertetésre kerülnek a tervezés elméleti szempontjai és irányelvei, valamint egy tervezett rendszer részletei. A tervezett rendszer elemeiből egy-egy prototípus is készült, melyek működőképességének tesztelését is bemutatja.

Abstract

During the evolution of audio systems, the need became stronger to reproduce not only the volume of the audio sources, but the proper sense of direction as well. Today's leading solutions are mainly such versions of cinema systems, that were designed for home usage. Such systems are the Dolby Stereo, 5.1 and 7.1. The common principle of these systems is the proper controlling of several speakers placed around a fixed spot (which is the so-called Sweetspot) in a specified geometry.

These systems due to their practicality and low price became widely used, the majority of multimedia content is compatible with them. Another great advantage is that these are compatible with older solutions as well.

The problem is that they don't reproduce the wavefield physically, therefore the sense of direction is only appropriate in the sweetspot.

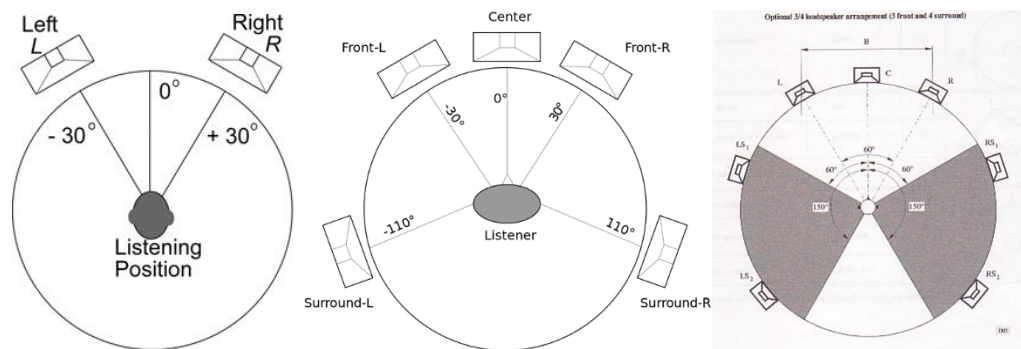
A solution to this problem is the method of Wave Field Synthesis. It achieves the physical reproduction of the wave field in a wider area of inspection with the proper controlling of each speaker in an array of many small speakers with different signals.

There is no widely available realization of WFS systems, because it has many problems. Several factors result in contradictory requirements, therefore a compromise must be made.

This dissertation presents the designing of a WFS-compatible speaker system. The theoretical principles, and the details of a planned system will be shown. A prototype was made from each element of the system for testing purposes, these tests are also detailed.

1 Bevezetés

A napjainkban használatos audio rendszerek döntő többségének eredete a filmiparban használatos rendszerekre vezethető vissza. Ezek közül a jelenleg legelterjedtebbek a Dolby Stereo, 5.1 és 7.1 rendszerek. Ezen rendszerek közös alapelve, hogy a hallgatót egy fix pozícióba helyezik (ez az úgynevezett sweetspot), és körülötte a csatornák számától függő geometriában helyeznek el hangforrásokat. Az egyes hangforrásokat külön vezérlik olyan módon, hogy a hangforrások terének összege a hallgató pozíciójában megfelelő irány- és hangosságérzetet adjon.



1.1 ábra: 2, 6 és 8-csatornás rendszerek ideális elhelyezése

Ezen rendszerek előnye, hogy egyszerűen kezelhetők, megfelelően elterjedtek, és a hallgató pozíciójában valóban képesek a megfelelő hangtér érzetét előállítani, azonban a tényleges hangteret nem reprodukálják fizikailag. Ebből következik, hogy ezen rendszerek csak ebben a pontban tekinthetők megfelelőnek, a hangosság - és irányérzet ebből a pontból kilépve jelentősen megváltozik.

Adott az igény tehát olyan rendszerek tervezésére, melyek a hangteret egy kiterjedt térrészben képesek fizikai szinten is reprodukálni, nem csak egy adott pontban. Így a hallgató ezen a térrészen belül bárhol tartózkodhat, az általa érzékelt hangtér nem változik. Ezen problémára nyújt megoldást a hangtér-szintézis módszere, melyet a következő fejezet mutat be.

A hangtér-szintézis rendszerek megvalósítása azonban nem egyszerű feladat, a tervezés során több szempontot figyelembe kell venni, melyek ellentmondó követelményeket támasztanak. Ezen szempontok vizsgálata alapján meg kell találni azt a kompromisszumot, mellyel megfelelő mértékben elérjük a kitűzött célokat.

Dolgozatomban vázolom a hangtér szintézis rendszerek tervezéséhez szükséges elméleti háttérrel, a tervezés szempontjait, és egy általam tervezett megvalósítást. Ez tartalmaz egy teljes hangtér szintézisre alkalmas rendszert, melynek elemei egy megfelelően választott hangszórótípus, a hangszóróhoz tervezett hangláda, és a hangszórókat meghajtani képes kompakt erősítő.

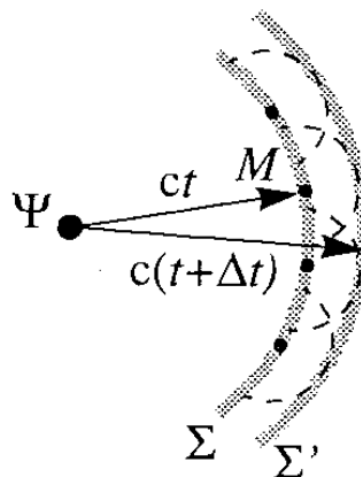
A dolgozat célja az elméleti tervek megalkotása, és egy prototípus tesztelése a működőképesség, és a tervezés helyességének ellenőrzése céljából.

2 A hangtér-szintézis elméleti alapja

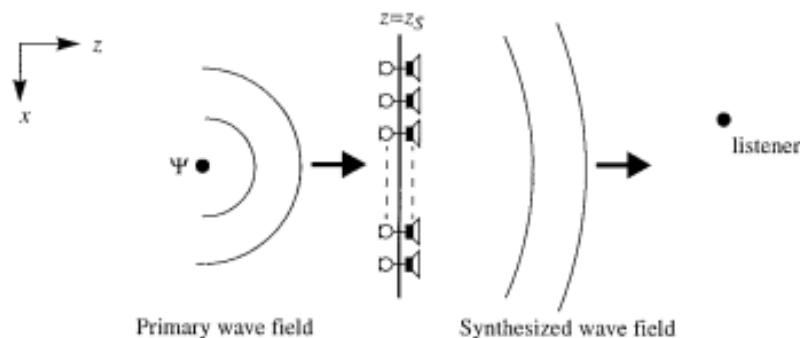
A hangtér-szintézis módszerének alapja a Huygens elv. A Huygens elv kimondja, hogy egy hullámfront minden egyes pontja egy elemi pontforrásként modellezhető, amely újabb hullámot bocsát ki. Az időben később kialakuló hullámfront ezen elemi pontforrások hullámterének burkolója, ezt szemlélteti 2.1.1 ábra.

Ezt az elvet Fresnel 1818-ban azzal egészítette ki, hogy a hullámfront elemi forrásai gömbhullámokat bocsátanak ki, az eredő hullámfront pedig ezek interferenciájaként áll elő. Ezt nevezzük Huygens-Fresnel elvnek.

Ezen elv alapján lehetséges lehet az elemi források pontos modellezésével és reprodukálásával az eredő hullámfrontot előállítani. Ezt használja ki a hangtér-szintézis módszere. Az eredő hangforrás terét úgy hozza létre, hogy a másodlagos források tereit reprodukálja, melyek összegeként előáll az eredő hullámter, lásd 2.1.2 ábra.



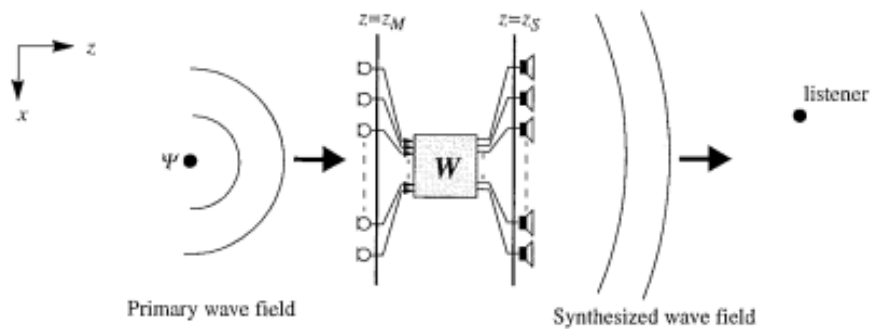
2.1.1 ábra: A Huygens-elv illusztrálása



2.1.2 ábra: Hangtér-szintézis rendszer működése

Háromdimenziós hullámter reprodukálásához egy kétdimenziós síkban elhelyezett források lennének szükségesek. Az emberi irányhallás azonban vertikálisan nem jelentős, a hangforrások elhelyezkedését leginkább tanult módon tudjuk meghatározni. Éppen ezért a hullámteret elegendő a hallgatás síkjában reprodukálni. Ehhez egy forrásokból álló egydimenziós görbe (pl egyenes) szükséges, melyet a hallgatás síkjában helyezünk el. Ez a szükséges hangsugárzók számát is csökkenti, ami a gyakorlati kivitelezés szempontjából kedvező.

Ennek legegyszerűbb megvalósítása egy vonal mentén ekvidisztánsan elhelyezett hangszórósor. Ideális esetben a hangszórók frekvenciaátvitele a hallható tartományban (körülbelül 20Hz – 20kHz) konstans, méretük és távolságuk kicsi. Fontos szempont, hogy a hangszórók mindegyikét külön kell vezérelni. A vezérlőjelek legegyszerűbb előállítását, ha az eredeti hullámteret a hangszórósorral megegyező elrendezésű mikrofonokkal felvesszük, és ezekkel a jelekkel vezéreljük a hangszórókat (lásd 2.1.3 ábra).



2.1.3 ábra: Hangtérszintézis rendszer vezérlőjeleinek egyszerű előállítását

Lehetséges azonban a vezérlőjelek előállítását modellezéssel is. Amennyiben adott egy hangforrás, melynek jele és térbeli elhelyezkedése adott, valamint ismert a WFS rendszer pontos elrendezése is, kiszámolható a hangforrás terét reprodukálni képes másodlagos források jele is az úgynevezett vezérlőfüggvényekkel. Ez minden forrás esetén eltérő, ezért szükséges feltétele a WFS rendszer kivitelezésének, hogy minden forrást külön jellel vezéreljünk [1].

A hangtérszintézis rendszerek alapvető működési elve tehát azon alapul, hogy sok elemi forrás megfelelő vezérlésével állítanak elő egy adott térrészben olyan eredő hullámfrontot, mely jól közelíti a modellezni kívánt forrás terét (ideális esetben meg is egyezik vele).

3 A hangtársintézis rendszerek megvalósítása

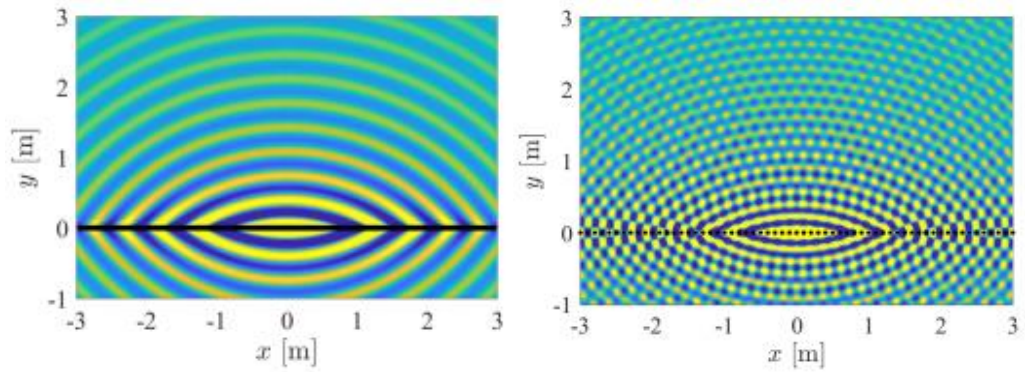
3.1 A megvalósítás problémái:

A hangtársintézis rendszer elméleti kialakítása során nem vettünk figyelembe olyan tényezőket, amelyek a megvalósítás szempontjából azonban jelentős kompromisszumokat igényelnek. Az elméleti modell (lásd 2.) alapján elemi pontforrásokat kellene ideális esetben 0 távolságra elhelyezni, hogy a hangteret tökéletesen szintetizálni tudjuk. A pontforrások minimális kiterjedésű források, melyek a tér minden irányába frekvenciától függetlenül azonos intenzitással sugároznak.

A valóságban azonban ilyen ideális forrás nem létezik, hangsugárzókat csak diszkrét távolságra lehet elhelyezni a kiterjedésük miatt. A célnak legjobban megfelelő forrás az elektrodinamikus hangszóró, ugyanis a hangsugárzók közül ennek frekvenciaátvitelle egyenletes a legszélesebb frekvenciatartományban. Mivel pontforrásokat modellezünk, egy darab szélessávú hangszóró használata előnyösebb a többutas hangfal megoldásokkal szemben, ugyanis ez jobban közelíti a pontforrás tulajdonságait. Az elektrodinamikus hangszórókra jellemző, hogy mélyfrekvenciás átvitelük annál jobb, minél nagyobb kiterjedésű a rezgő membrán (lásd 4.1), így szélessávú hangszórók esetén is várhatóan a nagyobb átmérőjű hangszórók átviteli tartománya lesz szélesebb. Ez ellentmond a hangtársintézis rendszerek azon elvének, hogy a forrásokat egymáshoz minél közelebb helyezzük el.

A források diszkrétizációjának jelentős problémája, hogy bizonyos frekvencia fölött az egyes források hullámfrontjai nem alkotnak egy folytonos, egybefüggő hullámfrontot, ehelyett interferenciajelenségek jelennek meg. Ezt a jelenséget nevezzük térbeli átlapolódásnak, melyet a 3.1.1 ábra szemléltet.

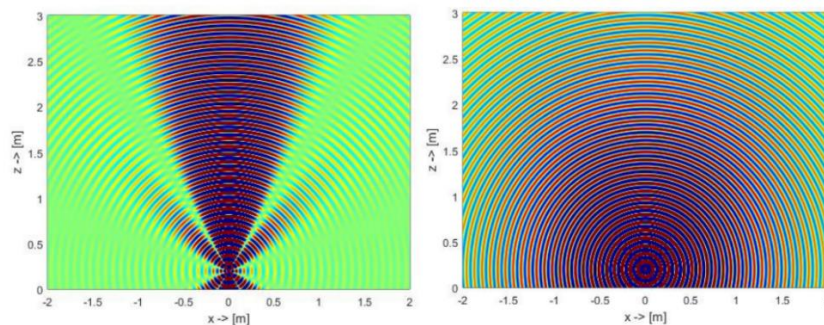
Az a hullámszám, mely fölött fellép az átlapolódás jelensége a térbeli mintavételezési tétel alapján kiszámolható: $k_{x,Nyq} = \frac{\pi}{\Delta x}$, ahol $k_{x,Nyq}$ a diszkrétizációból eredő úgynevezett Nyquist-hullámszám (mely fölött fellép az átlapolódás jelensége), Δx pedig a források távolsága. A hullámszám alapján a határfrekvenciát a $f = \frac{ck}{2\pi}$ egyenlettel számolhatjuk ki (ahol f a frekvencia, c a hang terjedési sebessége, k a hullámszám).



3.1.1 ábra: A hullámter reprodukciója folytonos eloszlású és diszkrét távolságban lévő pontforrások esetén

A térbeli átlapolódás megszüntethető a vezérlőjelek előszűrésével. Ezen módszer lényege, hogy a jelekből egy aluláteresztő szűrő segítségével kiszűrjük azokat a frekvenciákat, melyeken már fellép az átlapolódás jelensége (azaz nagyobbak a Nyquist-frekvenciánál).

A térbeli átlapolódás jelenségének modellezése során figyelembe kell vennünk a hangszórók iránykarakterisztikáját is. Az elektrodinamikus hangszóró iránykarakterisztikája függ a frekvenciától és a membrán méretétől. Minél nagyobb átmérőjű a membrán, illetve minél magasabb a frekvencia, annál keskenyebb a főnyaláb (lásd 3.1.2 ábra), tehát a hangszóró térbeli aluláteresztő szűrőként viselkedik. A szűrő -3 dB-es törésponti hullámszáma $k_{x,c} \approx \frac{2,22}{r_0}$ ahol r_0 a membrán átmérője. Egy vonal mentén történő elhelyezés esetén a források legkisebb elérhető távolsága $r_0 = \frac{\Delta x}{2}$. Ekkor a törésponti hullámszám értéke Δx -el kifejezve $k_{x,c} \approx \frac{4,44}{\Delta x}$, mely nagyobb a Nyquist-hullámszámnál ($k_{x,Nyq} = \frac{\pi}{\Delta x}$). Ez azt jelenti, hogy a van olyan hullámszám, mely esetében megjelenik az átlapolódási jelenség [2].

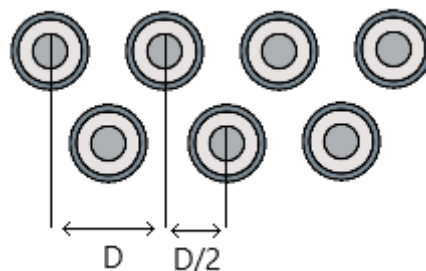


3.1.2 ábra: kör alakú elektrodinamikus hangszóró iránykarakterisztikája $f=4$ kHz-en, $D=5$ cm-es (jobb oldalt) és $D=20$ cm-es (bal oldalt) membránátmérő esetén [3]

Ennek figyelembevételével hangszórókat nem egy vonalban helyeztem el, hanem 2 egymással párhuzamos sorban, egymáshoz képest eltolva, cikcakkos elrendezésben, lásd 3.1.3 ábra. Így az egy sorban elhelyezett hangszórók távolságának fele lett a források távolsága, vagyis a térbeli mintavételi frekvencia megduplázódik. Ekkor $r_0 = \Delta x$ emiatt $k_{x,c} < k_{x,Nyq}$, azaz az térbeli átlapolódás jelenségét a hangszórók iránykarakteristikájából eredő térbeli aluláteresztő szűrővel kompenzáltuk.

Ez elméleti szinten amplitúdó- és fázishibát okoz a rendszerben, ugyanis az egy vonalban elhelyezett hangszórókhoz képest eltérő távolságba kerülnek a hangszórók. Az elrendezés modellezése során azonban kiderült, hogy ez a fázishiba minimális mértékű, a várható hallgatási távolságban elhanyagolható [5]. Ez az elrendezés a hangnyomást sem befolyásolja, mert amennyiben a hallgatás síkja a függőleges távolság felénél helyezkedik el, a források hallgatótól mért távolságváltozása azonos.

Mindezek alapján ez az elrendezés kedvezőbb a térbeli átlapolódás jelenségének szempontjából, azonban továbbra is cél, hogy minél kisebb hangszórókat alkalmazzunk, hiszen mind $k_{x,c}$, mind $k_{x,Nyq}$ függ Δx -től.



3.1.3 ábra: a hangszórók tervezett elrendezése

3.2 A tervezéskor figyelembe vett célok:

A fent vázolt tényezők ellentmondó követelményeket eredményeznek. Az iránykarakterisztika és az átvitel szempontjából a nagy méretű hangszórók bizonyultak előnyösnek, az egyes sugárzók távolsága és a ládaméretük szempontjából pedig a minél kisebb hangszórók.

A helyzetet megkönnyíti, hogy az emberi irányhallás alacsony frekvenciákon jelentősen romlik, így ezeken a frekvenciákon nem szükséges a hullámtér reprodukálása a hangtér-szintézis módszerével, elegendő egy külső mélysugárzóval előállítani a mélyfrekvenciás hangokat. Ennek határa körülbelül 80Hz környékén van [5]. Éppen ezért

a hangdoboz tervezésekor elegendő az ennél nagyobb frekvenciákon egyenletes átvitelre törekedni.

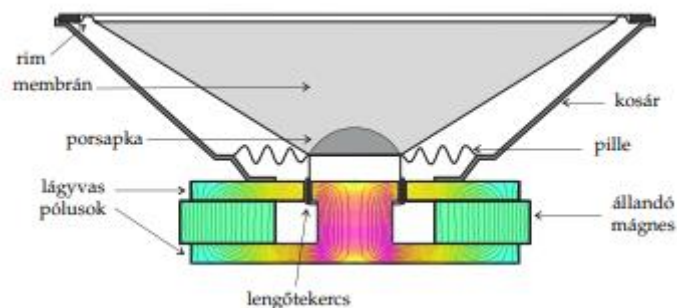
Mindezen tényezők figyelembevételével a cél tehát egy olyan rendszer létrehozása volt, melyre az alábbiak teljesülnek:

- Minél több elemű
- Az egyes hangládák mérete nem túl nagy
- Az egyes hangsugárzók minél közelebb helyezkednek el egymáshoz
- Frekvenciaátvitele a 80Hz-20kHz tartományban a lehető legegyszerűsebb
- Minden egyes hangsugárzója külön vezérelhető

4 Hangtárszintézis rendszer megvalósítására alkalmas hangláda prototípus tervezése

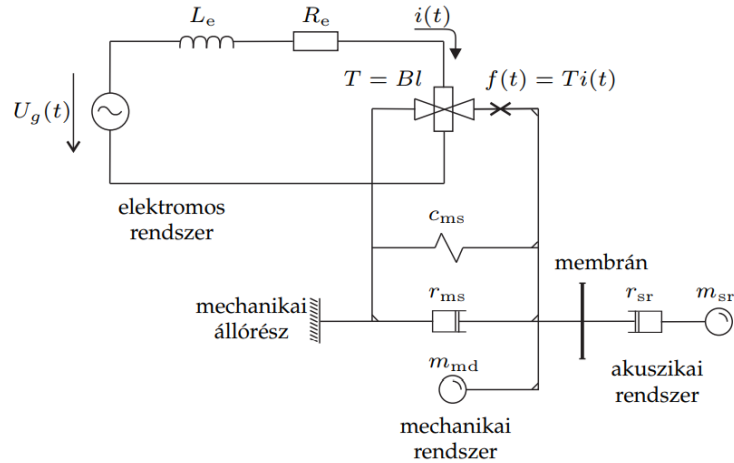
4.1 Az elektrodinamikus hangszóró dugattyúmodellje, és a TS paraméterek szerepe a tervezésben:

A leggyakrabban alkalmazott elektromechanikai átalakító az elektrodinamikus hangszóró. Ennek felépítését a 4.1.1 ábra szemlélteti:



4.1.1 ábra: az elektrodinamikus hangszóró felépítése

Alapvető működési elve, hogy a membránhoz rögzített lengőtekercs erős mágneses térben helyezkedik el, így azon áramot folytatva mozgásba hozható a teljes rezgőrész, mely ennek hatására megrezgeti a levegőt, így indítva el a mechanikai hullámokat. Az elektrodinamikus hangszóró rendelkezik egy állórésszel (kosár, lágvas pólusok, mágnes) és egy rezgőrésszel (membrán, lengőtekercs, porsapka, pille, rim). Annak érdekében, hogy az elektrodinamikus hangszóró viselkedését megfelelően tudjuk modellezni, bizonyos egyszerűsítésekkel kell élnünk. Feltesszük, hogy a membrán teljesen merev, és egy irány mentén végez dugattyúmozgást. Az ebből a feltevésből kiinduló modellt hívjuk az elektrodinamikus hangszóró dugattyúmodelljének. Ennek segítségével a hangszóró viselkedése koncentrált paraméterekkel leírható. A koncentrált paraméterek modellje a 4.1.2 ábrán látható:



4.1.2 ábra: Az elektrodinamikus hangszóró koncentrált paraméterű modellje

Az ábrán jól láthatóan elkülönül az elektromos rész (ez egy valós tekercs modellje, mely egy soros ellenállásból és induktivitásból áll), és a mechanikai rész. A mechanikai rész elemei a következők: a membrán és a tekercs össztömege (m_{md}), a pille és a rim engedékenysége (c_{ms}), valamint a felfüggesztések veszteségét modellező veszteségi ellenállás (r_{ms}). Mivel a dugattyúmodellben a rezgőrész együtt mozog, ezek sebessége közös. A mechanikus rész gerjesztését az elektromechanikai átalakító végzi.

A modell akusztikai része továbbá a membránt terhelő levegőtömeg, ezt egy sugárzási impedanciával modellezzük. Ez kifejezhető egy végtelen falba épített dugattyú esetén, így a tervezés során ezt a közelítést használjuk.

A hangszóró frekvenciaátvittele a mechanikai rezgőrendszer gyorsulására vezethető vissza. Alacsony frekvenciák esetében a lengőtekercs induktivitása elhanyagolható, ekkor az átviteli függvény a következő formában felírható:

$$H(\omega) = K \frac{(j\omega)^2}{(j\omega)^2 + \left(\frac{\omega_0}{Q_{ts}}\right)j\omega + \omega_0^2} \quad (1.)$$

ahol K az erősítési tényező, Q_{ts} az eredő jóssági tényező, ω_0 pedig a rendszer rezonanciakörfrekvenciája. A modell paramétereivel az értékek a következőképpen fejezhetők ki [6]:

$$K = \frac{T}{R_e} \frac{1}{m_{ms}},$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{c_{ms} m_{ms}}},$$

$$Q_{ts} = \frac{1}{2\xi} = \frac{1}{\omega_0 c_{ms} \left(\frac{T^2}{R_e} + r_{ms} \right)}.$$

(2.)

Az 1. formula alapján az elektrodinamikus hangszóró kisfrekvenciás esetben felüláteresztő szűrőként viselkedik. A szűrő törésponti frekvenciája éppen az ω_0 -ból számított rezonanciafrekvencia, tehát a hangszóró átvitele ezen frekvencia alatt jelentősen romlik. A 2. formulából jól látható, hogy az ω_0 rezonanciakörfrekvenciát a mozgórész együttes tömege és a membránfelfüggesztés engedékenysége határozza meg. Kis tömegű mozgórész esetén ez nagyobb, tehát általánosságban érvényes, hogy a kisebb méretű hangszórók rezonanciafrekvenciája nagyobb (ezt a tendenciát nem lehet kellő mértékben ellensúlyozni az engedékenység növelésével). A rezonanciafrekvencia környékén a hangszóró viselkedését az eredő jósági tényező (Q_{ts}) határozza meg (minél nagyobb az eredő jósági tényező, annál nagyobb kiemelés figyelhető meg a rezonanciafrekvencia környékén). Az eredő jósági tényezőt befolyásolja a hangláda kialakítása is (lásd 4.2). Annak érdekében, hogy a rezonanciafrekvencia minél alacsonyabb legyen tehát célszerű nagyobb méretű hangszórókat alkalmazni.

Az elektrodinamikus hangszóró dugattyúmodelljének mélyfrekvenciás viselkedését az ún. Thiele/Small (TS) paraméterekkel írhatjuk le. Ezek a paraméterek csoportosíthatók elektronikai, mechanikai és elektromechanikai paraméterekre.

Az elektronikai paraméterek a tekercs ohmos ellenállása (R_e) és induktivitása (L_e), a tekercs és a mágneses mező viszonyát jellemző $T=Bl$ transzmissziós tényező és az elektromos oldali rezgőkör jósági tényezője (Q_{es}).

A mechanikai paraméterek a rezgő rendszer tömege (m_{ms}), a felfüggesztés rugóengedékenysége (c_{ms}), a hangszóró mechanikai rugójának megfelelő ekvivalens levegő térfogat (V_{as}), a mechanikai rendszer veszteségi tényezője (r_{ms}), a membrán hatásos felülete (S_d), a rezonanciafrekvencia (f_s) és a mechanikai rész jósági tényezője (Q_{ms}).

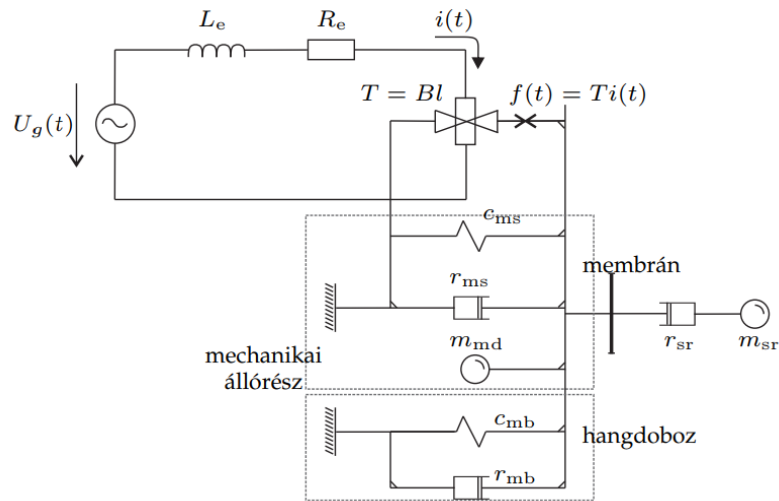
Az elektromechanikai paraméterek a teljes rendszer tulajdonságait írják le, legfontosabb ezek közül a teljes jósági tényező (Q_{ts}), mely a mechanikai és elektronikai jósági tényezők szorzata. [7]

Ezen paramétereket a hangszórók gyártói közölni szokták a hangszórók specifikációi között. A paraméterek ismeretében tervezhető a megfelelő hangláda, ehhez számos szoftver áll rendelkezésre. Munkám során a WinISD nevű program segítségével modelleztem a lehetséges hangládakialakítások átvitelét. Ez a program a hangláda kialakításának és térfogatának, valamint az adott hangszóró TS paramétereinek ismeretében modellezi a mélyfrekvenciás átvitelt.

4.2 A ládaméretezés és a láda formájának szerepe a hangfal karakterisztikájában

A hangfal átviteli karakterisztikájában jelentős szerepe van a hangszórót tartalmazó hangládának. A hangláda különböző méretű és kialakítású lehet. A szimulációk alapján legkedvezőbb kialakítás a zárt hangdoboz volt.

A zárt hangláda a következőképpen modellezhető: a hangszóró mögötti zárt légüregben található légtömeg rendelkezik saját engedékenységgel, illetve súrlódási veszteséggel (tehát valós rugóként viselkedik). [8] A mozgó légtömeg egyik fele a membránnal azonos sebességű, másik fele a dobozhoz, mint állórészhez kapcsolódik. A zárt dobozba épített hangszórónak, mint rendszernek tehát a végtelen falba épített hangszóróhoz képest változik az eredő engedékenysége (c_{ms}), és az eredő vesztesége (r_{ms}). A zárt doboz tervezése során ezeket a paramétereket kell olyan módon megválasztani, hogy a hangfal átvitelének csillapítása a kívánt mértékű legyen. Mivel jelen esetben az egyenletes és minél nagyobb sáv szélességű átvitel a cél, ezért olyan hangszórót célszerű választani, melynek rezonanciafrekvenciája alacsony, az eredő jósági tényező pedig kis térfogatú hangláda esetén optimális. Ez a $Q_{ts}=0,707$ értékenél következik be (ekkor beszélünk maximális lapos átvitelről), ugyanis ennél az értéknél a rezonanciafrekvencia környékén már éppen nincs kiemelés az átvitelben. Az ehhez tartozó hangláda térfogat a választott hangszórótól függ.

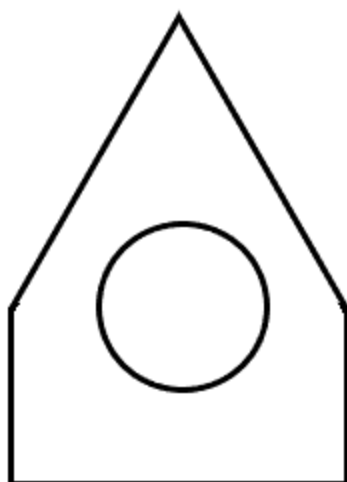


4.2.1 ábra: Hangfal koncentrált paraméterű modellje zárt hangláda esetén

A hangláda kialakításának másik jelentős szempontja az úgynevezett modális viselkedés elkerülése. Ez akkor következik be, mikor egy adott frekvenciához tartozó hullámhossz megegyezik a hangláda valamelyik fizikai dimenziójával [9]. Ennek oka, hogy a hangszóró légüregében állóhullámok alakulhatnak ki. Ez leggyakrabban nemkívánatos egyenetlenségeket okoz a hangfal átviteli karakterisztikájában. Ezt a jelenséget azzal lehet csökkenteni, ha a hangládát hangelnyelő szivaccsal béleljük ki, illetve a geometriai tervezés során kerüljük a párhuzamos oldalfalakat. A ládatervezés során mindkét módszert alkalmaztam.

A hangláda geometriájának kialakítása során szem előtt kellett tartani a hangláda felhasználását. A cél az egyes hangszórók már említett kétsoros elrendezése, a hangládát tehát úgy kellett kialakítani, hogy ezt lehetségessé tegye. Legegyszerűbb megoldás, ha a hangszórókat egy-egy szemből háromszög alakú hangláda csúcsába helyezzük, a második sor hangládát pedig fejjel lefele fektetjük erre a sorra. Egy-egy hangláda alakja tehát háromszög alapú gúla lenne. Ebben az esetben problémát okoz, hogy a kellő térfogat eléréséhez vagy a hangláda alapterületét, tehát a háromszög nagyságát kell növelni, vagy a hangláda mélységét. Előbbi esetben nő a hangszórók közti távolság, utóbbi esetben pedig a hangláda formája rendkívül kényelmetlenné tenné az elhelyezést.

Ennél célszerűbb megoldás, ha az alapterület növelésére a következő kialakítást vesszük:



4.2.2 ábra: a tervezett hangláda formája

Ebben az esetben a térfogat kisebb mélységgel is elérhető, hiszen az alapterület jóval nagyobb. Ezen kívül a modális viselkedés elkerülése érdekében a hangláda hátlapja is döntött, a térfogat csökkentése nélkül. Az így kapott hangládaformát, és a teljes WFS rendszer látványtervét a 3.2.3 és 3.2.4 ábra mutatja:

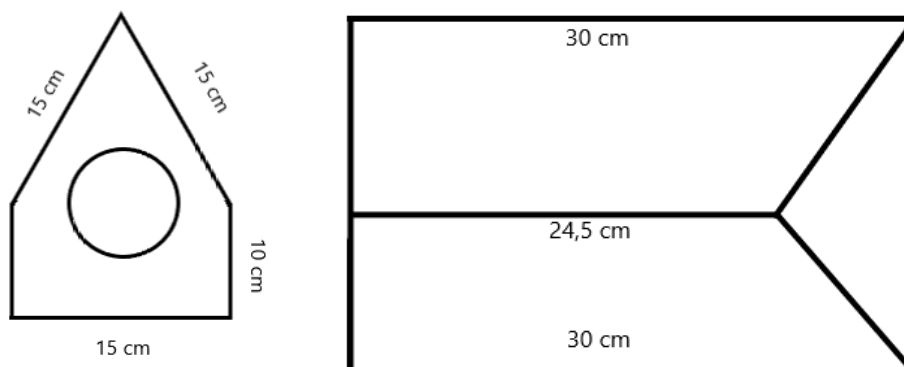


4.2.3 ábra: a tervezett hangláda látványterve



4.2.4 ábra: a teljes WFS rendszer látványterve

Az elkészült hangláda pontos terveit a 4.2.5 ábra szemlélteti:



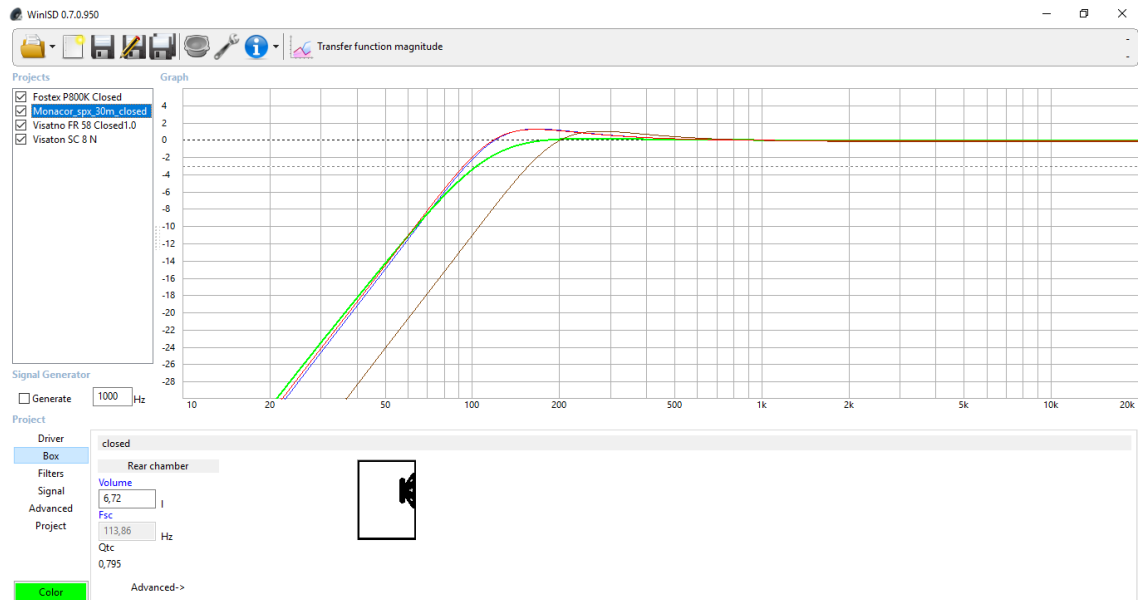
4.2.5 ábra: a tervezett hangláda méretei és geometriája előlről és oldalról

4.3 A hangszóró választásának szempontjai:

A megfelelő hangszóró választásakor több szempontot is figyelembe kellett vennem, elsődleges a hangszóró méretével kapcsolatosan. A hangtér reprodukciójának sikeressége nagyban múlik az egyes hangforrások távolságán, így minél kisebb, de frekvenciaátvitel szempontjából kielégítő hangszórót kellett választani. Másik jelentős szempont a szimuláció alapján kapott várható átviteli függvény. A szimulációkkal meghatározható a maximális lapos átvitelhez ($Q_{ts}=0,707$) tartozó hangláda térfogat is, mely a használhatóság szempontjából lehet fontos tényező, ugyanis sokelemű rendszer

esetén különösen fontos, hogy egy darab elem mérete mekkora. Nem elméleti szempontból ugyan, de szintén fontos tényező lehet a hangszóró ára is.

Mindezen tényezőket figyelembe véve 4 lehetséges hangszórót modelleztem le, ezek a Fostex P800K, Visaton FR58, Visaton SC 8 N és a Monacor SPX-30M voltak.



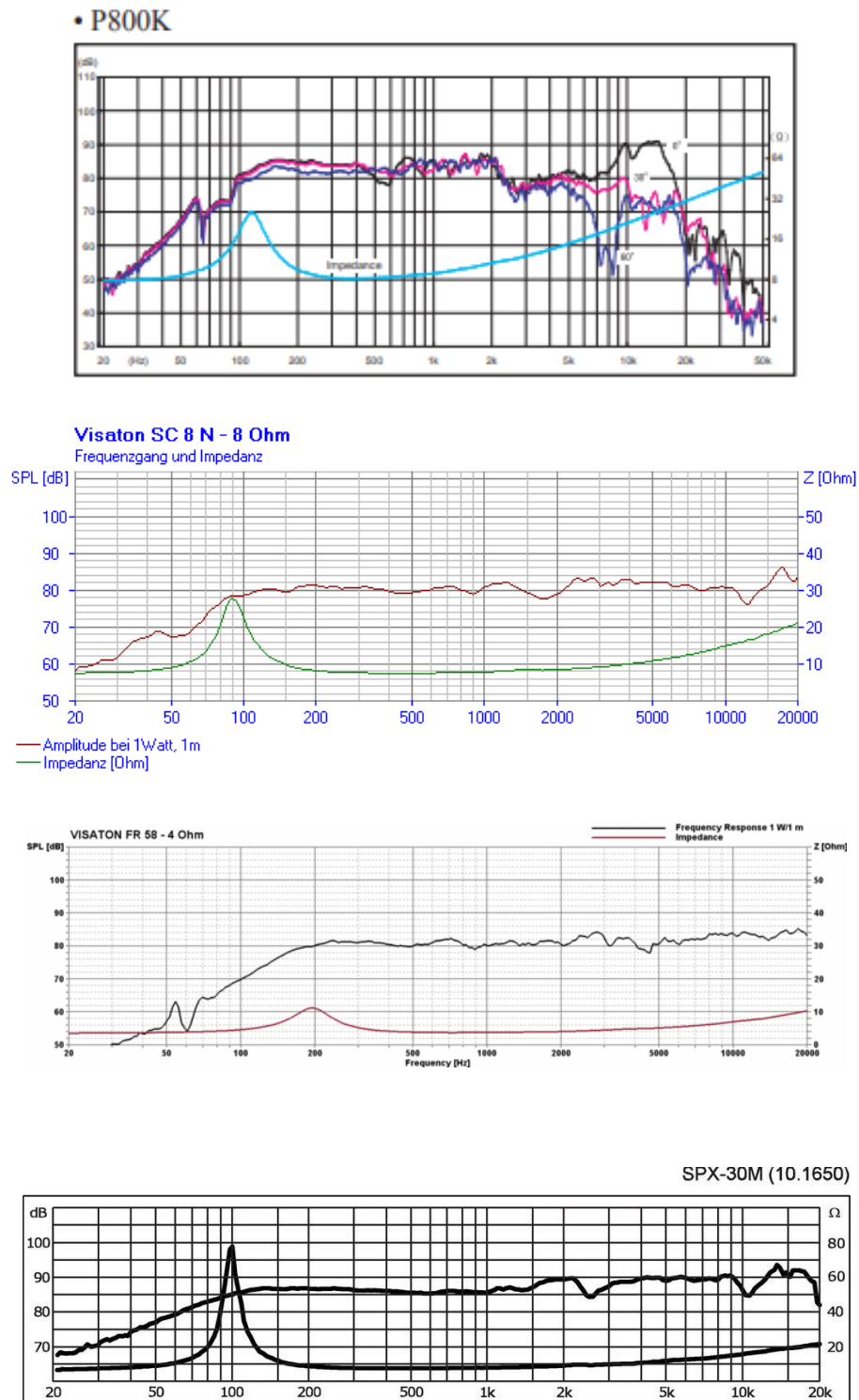
4.3.1 ábra: A hangfalak zárt hangláda esetén szimulált átviteli karakterisztikája a TS paraméterek alapján

A modellezés alapján a következő konklúziókat vontam le:

- A Fostex P800K és a Visaton SC 8 N nagyon hasonló átvittel rendelkezik, rezonanciafrekvenciájuk alacsonyan van, azonban a megfelelő átvitel eléréséhez szükséges hangláda térfogat túl nagy.
- A Visaton FR58 kisebb méretű hangszóró, ezért olcsóbb és elméletileg kisebb hangládában is elfér, azonban a méretéből is következően nem képes az alacsonyabb frekvenciákon kielégítő átvitelre, rezonanciafrekvenciája a többi szélessávú hangszóróhoz képest túl magas frekvencián van.
- A Monacor SPX-30M a legmegfelelőbb hangszóró, rezonanciafrekvenciája megfelelően alacsony, és a maximális lapos átvitelt viszonylag kis térfogatú (6,7l) hangládában eléri.

- Sajnos egyik hangszóró átvitele sem éri el az emberi irányhallás határát (kb. 80Hz), azonban a hangláda és a hangszóró méretei miatt elfogadtam ezt a kompromisszumot.

A hangfalak elméleti modellezése mellett figyelembe vettem a hangszórók gyártók által mért átviteli karakterisztikáját is:



4.3.2 ábra: A hangszórók gyártó által mért átviteli függvénye

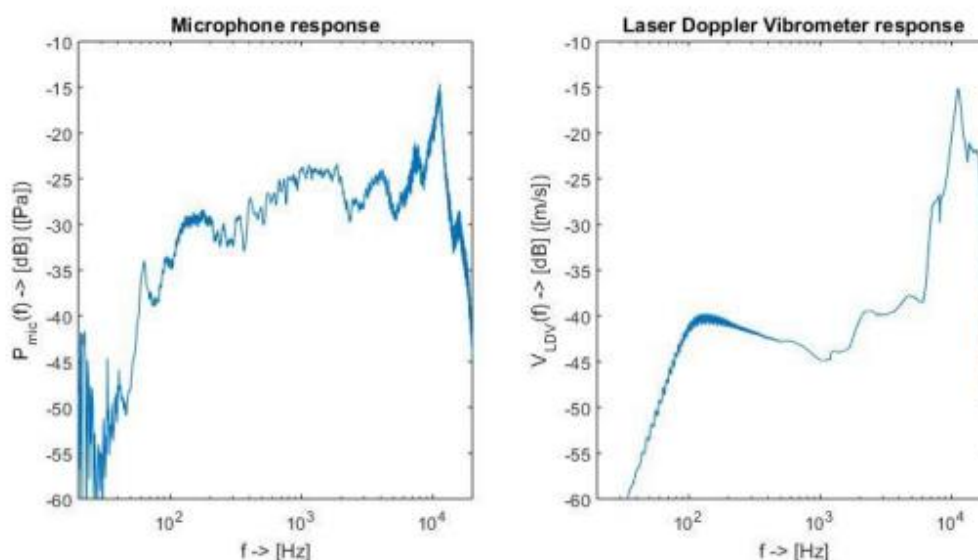
Ezek alapján szintén a Monacor SPX-30M lett a jó választás.

A tervezett hangláda térfogata $V=6,652\text{l}$, ilyen értékek mellett $Q_{ts} \approx 0,707$ és $f_s \approx 110\text{Hz}$ értékek becsülhetőek.

A tervezett hangládából egy prototípus is készült, melynek átviteli karakterisztikáját mérés alapján a 4.3.3 ábra szemlélteti [10].

A mérési eredmény alapján látható, hogy a hangszóró mélyfrekvenciás viselkedése közelítőleg a tervezetthez hasonló, a rezonanciafrekvenciája 110Hz környékére tehető (ez különösen a lézer-vibrométerrel mért átvitel esetében látható könnyen). Az átvitelben egy jelentős csúcs is megfigyelhető, kb 10kHz-en.

Mint látható, az átviteli karakterisztika nem mondható egyenletesnek, ezt a vezérlőjelek digitális előszűrésével lehet kompenzálni, ez a projekt folytatásaként később kerülne kivitelezésre.



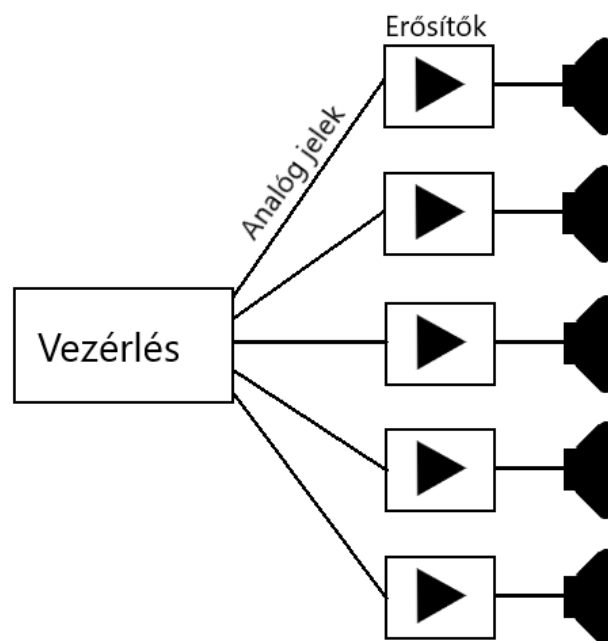
4.3.3 ábra: az elkészült hangláda prototípus átviteli karakterisztikája

5 A hangrendszer meghajtására alkalmas erősítőpanel tervezése

5.1 A tervezés elméleti szempontjai:

A hangtárszintézis rendszer megvalósításának szempontjából kulcsfontosságú a hangfalakat meghajtó erősítőáramkörök tervezése. Ezekkel kapcsolatos elvárás, hogy minden hangfalat külön legyenek képesek vezérelni, eltérő jelekkel, és megfelelő teljesítménnyel.

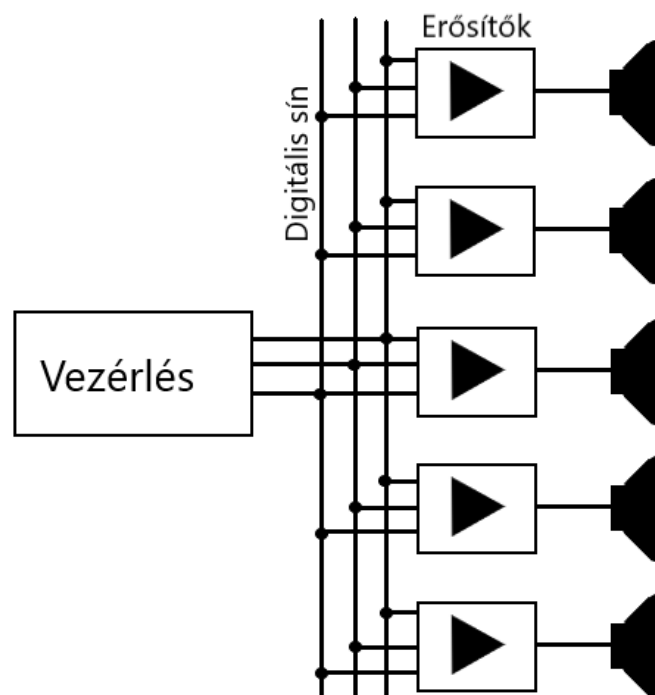
Kézenfekvő megoldás lehetne egy hagyományos analóg bemenetekkel rendelkező erősítőáramkörökkel rendelkező sokelemű erősítőrendszer. Ennek legnagyobb megvalósítási problémája az, hogy ebben az esetben az erősítőket meghajtó logikai vezérlésnek képesnek kell lennie megfelelő számú analóg vezérlőjelet előállítani, és továbbítani egymáshoz képest fázishelyesen. Ezen koncepció kritikus szempontja az erősítők átviteli karakterisztikája, ugyanis ez nemkívánatos késleltetést okozhat a rendszerben, valamint az egyes erősítők mérete.



5.1.1 ábra: Hangtárszintézis rendszer megvalósítása analóg vezérlőjelekkel

Egy másik megközelítés, ha ez erősítők digitális formában kapják meg a vezérlőjeleket az őket vezérlő logikai áramkörtől. Ennek előnye, hogy zajvédelme jobb, illetve a digitálisan kezelt jelekkel könnyebb logikai műveleteket végezni (pl jelek szűrése, késleltetése). Ebben az esetben a rendszer kivitelezhető úgy is, hogy a digitális vezérlőjeleket minden egyes erősítőblokk külön kapja meg (ez lényegében az analóg bemenetű rendszer felépítésével egyezik meg), illetve úgy is, hogy az erősítőáramkörök egy közös sínrendszeren kapnak jelet. Utóbbi megoldást szemlélteti a 5.1.2 ábra. Közös sínrendszer esetén megfelelő megoldást kell találni az egyes erősítőket vezérlő jelek elkülönítésére annak érdekében, hogy minden erősítő csak a neki szánt jellel legyen vezérelve.

Munkám során az utóbbi megoldást alkalmaztam. Az egyes csatornák jeleit digitális formátumban adottnak vettem.

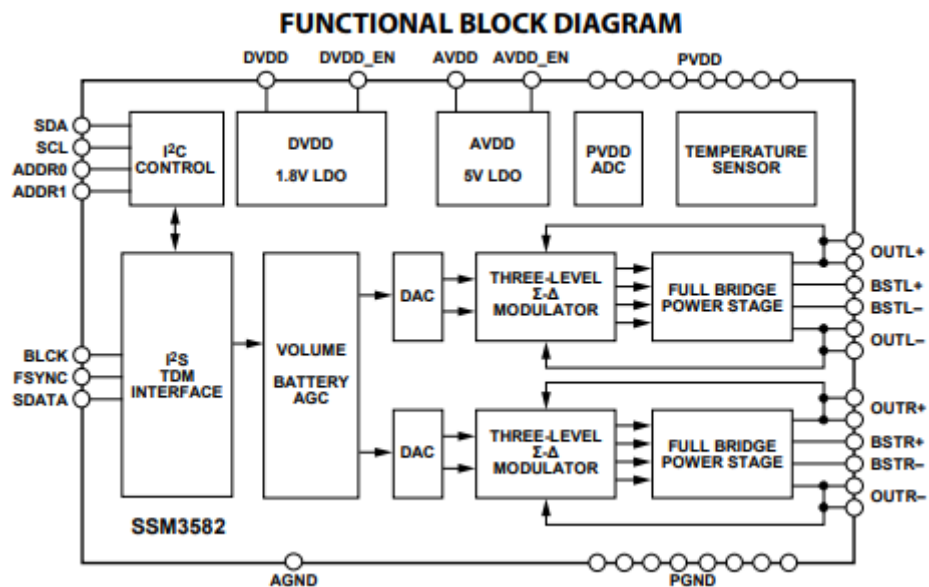


5.1.2 ábra: Hangtér-szintézis rendszer megvalósítása digitális sínrendszerrel

5.2 A választott célhardver (Analog Devices SSM3582):

A vázolt követelményeknek egyik megfelelő célhardver az Analog Devices SSM3582 [11]. Munkám során ehhez terveztem megfelelő NYHL-t (Nyomtatott Huzalozású Lemezt) és vezérlést.

Ez az erősítő digitális bemenettel rendelkezik, vezérelhető egyenként standard I2S jelekkel, illetve egy közös sínrendszerre helyezve több (legfeljebb 16) erősítő esetén időmultiplexált (Time Division Multiplex - TDM) jellel. Az erősítő számos funkcióval rendelkezik, többek között kimeneti limiterrel, túlmelegedés elleni védelemmel, állítható erősítéssel, tápfeszültségmérő rendszerrel, illetve egy diagnosztikai célú regiszterrel, melyben a működési hibákat tárolja. Az erősítő funkcionális blokkdiagramját az 5.2.1 ábra szemlélteti:



5.2.1-edik ábra: Az SSM3582 funkcionális blokkdiagramja

Az erősítő beállításainak és információinak kezelésére belső regiszterekkel rendelkezik. A regiszterek írása és olvasása I2C protokollal lehetséges, melyekhez az SDA és SCL bemeneteket kell megfelelően vezérelni. Az egyes erősítők I2C címét az ADDR0 és ADDR1 bemenetek állapota határozza meg. Ezekről függően az erősítő I2C címe 0x10 és 0x1F között változhat.

A digitális audio jelet az erősítő I2S protokollal kapja meg a BCLK, FSUNC és SDATA bemeneteken. Egy darab, külön vezérelt erősítő esetén ez a hagyományos I2S protokollok valamelyikével (I2S, right justified, left justified) történhet, több erősítő

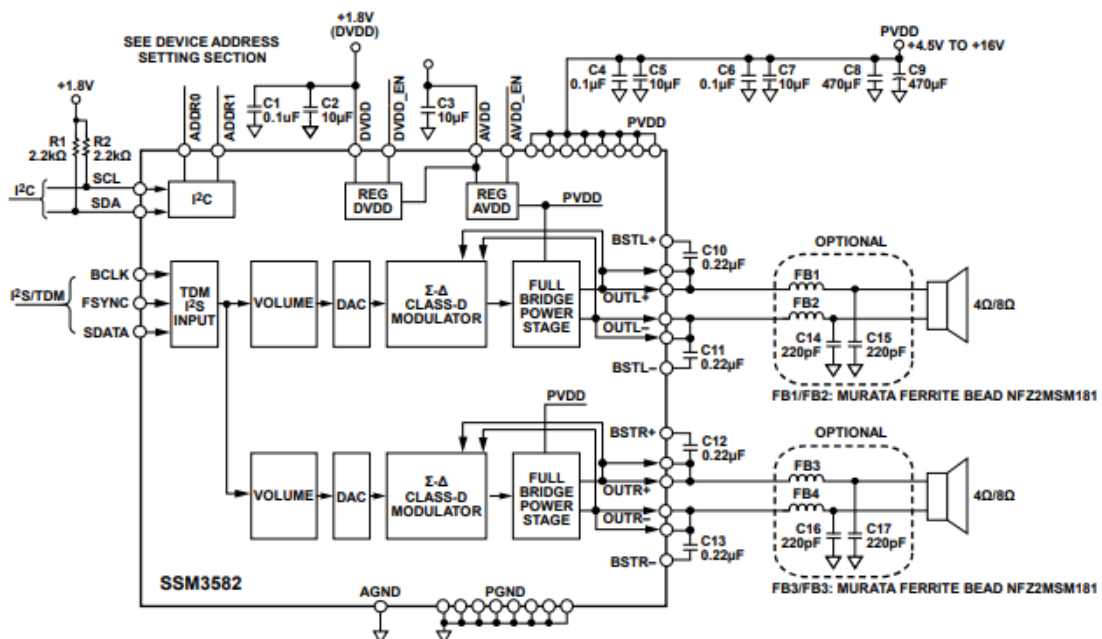
együttes vezérlésekor azonban ennek egy speciálisan módosított, időmultiplexált változatával.

Az erősítő három különböző bemeneti feszültséggel rendelkezik. A PVDD bemeneten 5–16V közötti DC feszültségszint megfelelő, ez a bemenet szolgáltatja a kimenetek meghajtásához szükséges teljesítményt. Az AVDD 5V-os referenciafeszültség az analóg blokkok működéséhez, a DVDD 1,8V-os referenciafeszültség, ez a digitális áramkörök működéséhez szükséges. Mind az AVDD, mind a DVDD referenciafeszültséget képes az erősítő belső regulátorral is előállítani, ennek vezérlése rendre az AVDD_EN és DVDD_EN bemenetek megfelelő potenciálra hozásával történik.

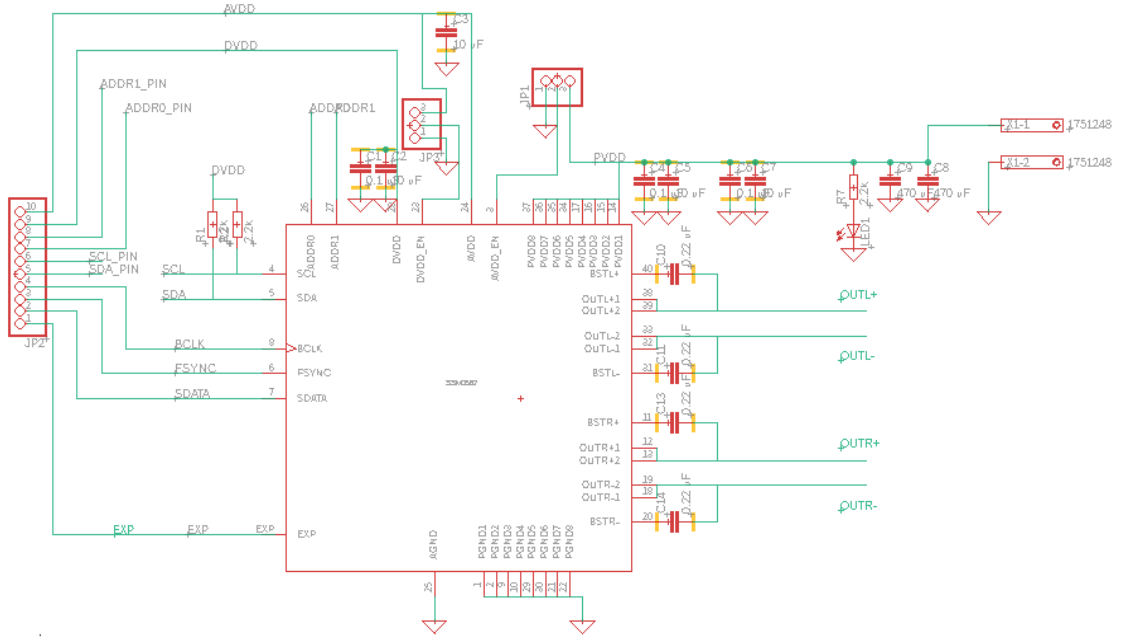
Az erősítő kimenete darabonként 2 független csatorna, saját DA konverterrel, 3 szintű Σ - Δ modulátorral és erősítő áramkörrel.

5.3 A tervezett NYHL, és az erősítő funkcionális leírása:

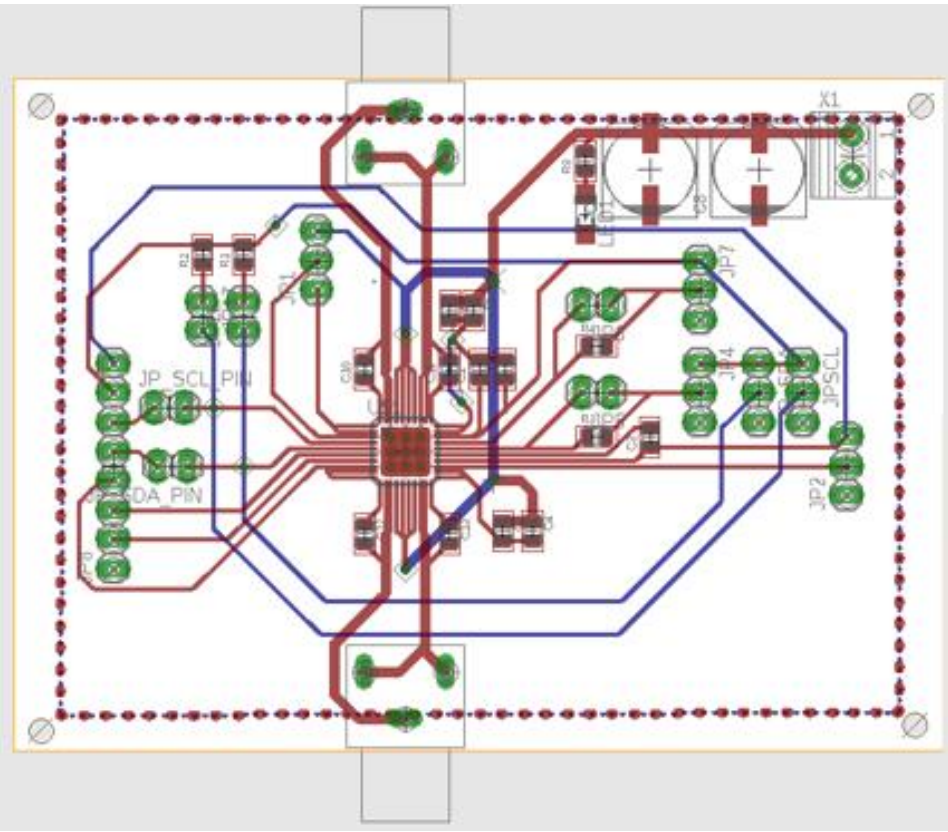
Az SSM3582 használatához saját fejlesztésű NYHL-t terveztem. Ez javarészt a gyártó által javasolt elemeket tartalmazta, illetve a különböző funkciók megvalósításához szükséges kiegészítő áramköröket. A gyártó által javasolt kapcsolást az 5.3.1 ábra, a megtervezett NYHL kapcsolási rajzát a 5.3.2 ábra, a NYHL végleges layout tervét pedig a 5.3.3 ábra mutatja.

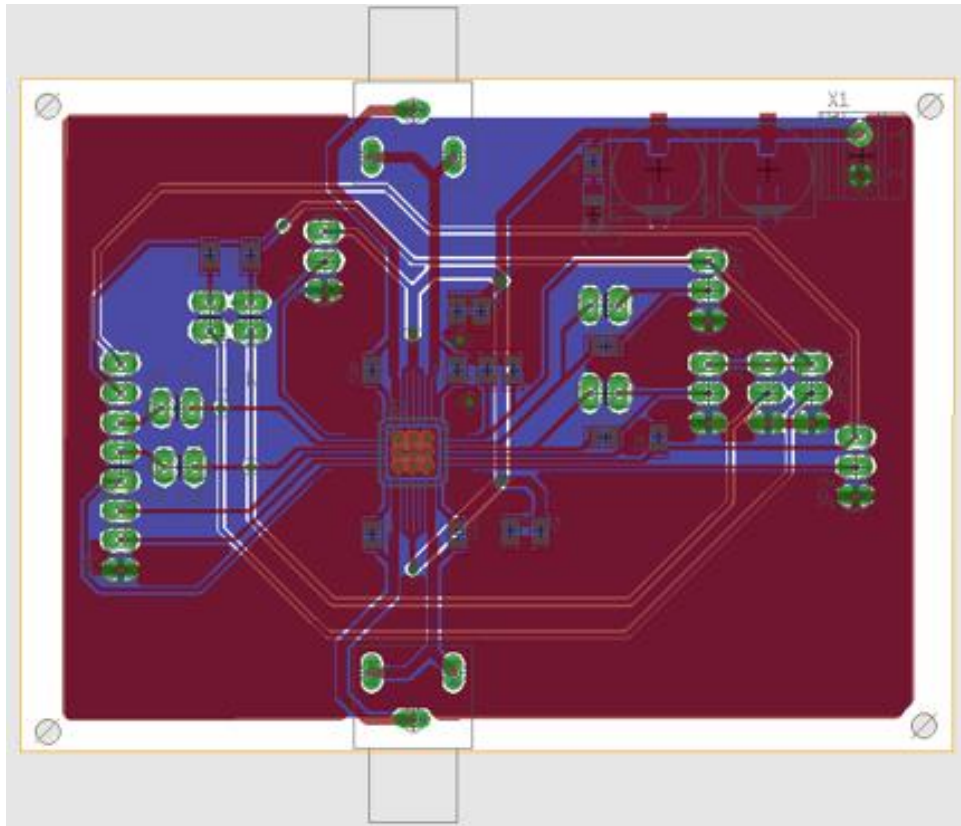


5.3.1 ábra: A gyártó által javasolt kapcsolási rajz



5.3.2 ábra: Az elkészített erősítőpanel elméleti kapcsolási rajza (A kapcsolási rajz nem teljes, egyes logikai funkciókat megvalósító kapcsolókat nem jelöl.)



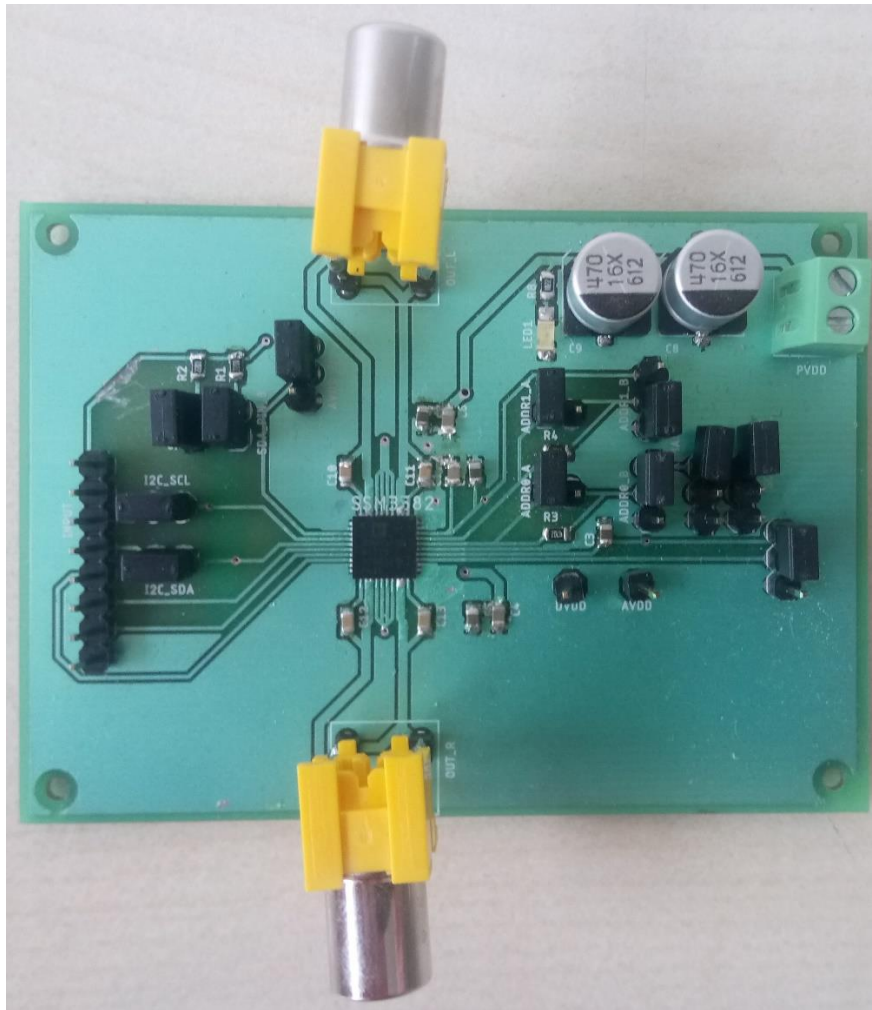


5.3.3 ábra: A tervezett NYHL

Az erősítőpanel elemei a következők:

- A megfelelően bekötött SSM3582, 6x6mm-es LFCSP (Lead Frame Chip Scale Packaging) tokozással
- A gyártó által javasolt buffer- és bootstrap kondenzátorok
- Tápcsatlakozó és a tápfeszültség jelenlétét visszajelző LED
- Egyes logikai funkciók (pl I2C címválasztás, TDM slot választás, referenciafeszültség-vezérlés) megvalósítására szolgáló jumperek
- Az I2C sín pull-up ellenállásainak leválasztó kapcsolója
- A digitális bemenetek (I2C, I2S) és a megfelelő referenciafeszültségek számára kialakított csatlakozósor
- Kimeneti csatlakozók a hangszórók felé
- A chip exposed pad-jének földelésére és egyúttal hűtésre szolgáló viák

Az elkészült erősítő kinézetét az 5.3.4 ábra mutatja.



5.3.4 ábra: az elkészült erősítőpanel

6 Az erősítő digitális vezérlése

6.1 Az erősítő működtetésének módjai

Az erősítőpanelt több különböző módban és funkcióval lehet üzemeltetni. Alapvetően az I2C protokoll segítségével elérhető regiszterek tartalma határozza meg a működés módját és specifikációit.

Egyik lehetséges használati mód, amikor az erősítőpanel egy darab, standard I2S jelet dolgoz fel. Ezt lehet egy, vagy akár egyszerre több erősítőnek is biztosítani. Ez a jel folyamatos és összefüggő, a jel értelmezésének pontos beállításait pedig az I2C regiszterekkel lehet konfigurálni. Beállítható többek között az adat helyzete az I2S frame-en belül, a mintavételezési frekvencia, a mintavételezés helye (fel- vagy lefutóélnél), minták bitszáma, és a LRC jel kívánt értelmezése. Az erősítőpanel tesztelése során ebben a módban dolgoztam.

Az erősítő másik lehetséges használati módja, amikor több (maximum 16) erősítőt vezérlünk egyszerre, közös vezérlősínen küldött egyéni jelekkel. Ilyenkor az I2S protokoll egy módosított változatát kell biztosítani az erősítőpaneleknek. Az egyes erősítőpaneleknek küldött adatokat multiplexálni kell, illetve az erősítőpanelek beállítása során meg kell adni az adott panel számára küldött adat helyét a teljes multiplex keretben. Ebben az esetben az FSYNC jel szerepe is módosul, egy pulzussal jelzi a TDM keret kezdetét. A teljes WFS rendszer megvalósításakor ebben a módban használjuk az erősítőket, így valósul meg a hangszórók egyidejű vezérlése eltérő jelekkel. Az erősítőpanelek végleges felhasználása során ebben a módban üzemelnek majd.

Alapvetően ilyen működés mellett is I2C protokollal kell felprogramozni az erősítőket, azonban lehetőség van úgynevezett Standalone módban való üzemeltetésre is. Ilyenkor az I2C protokollhoz használt bemeneteket (SCL, SDA, ADDR0, ADDR1) a közös vezérlősínről leválasztjuk (a megvalósított panelen jumperek segítségével), és azok megfelelő potenciálra hozásával megadhatjuk a szükséges információkat (multiplex frame-en belüli hely, mintavételezési frekvencia, mintánkénti bitek száma, mono vagy stereo mód). Ez azért lehet előnyös, mert az áramkörnek nincs szüksége további

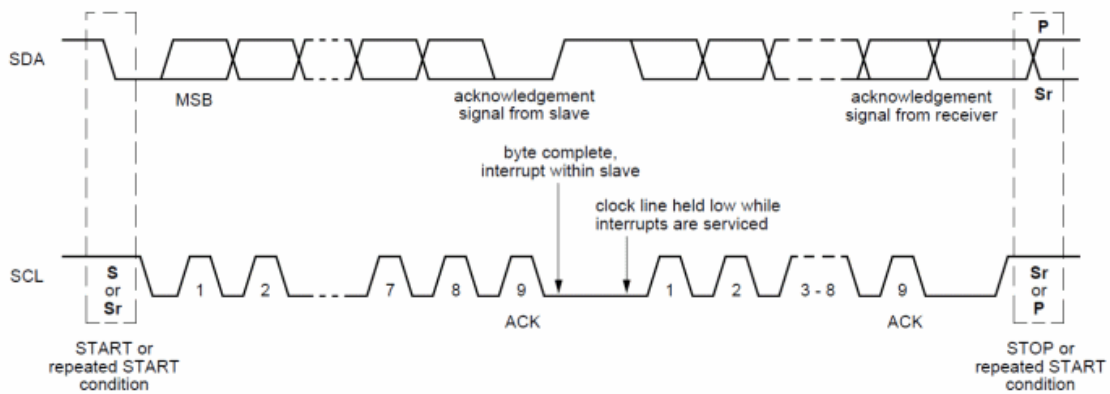
beállításra, tehát például előre ismeretes felhasználás esetén a NYHL megfelelő módosításával hardveresen lehet a szükséges beállításokat elérni.

6.2 A vezérlőjelek formátuma

Az I2C (Inter-Integrated Circuit) protokollt a Philips Semiconductor szabványosította 1982-ben [12]. A protokoll célja, hogy rövid távú adatkapcsolatot biztosítson áramkörüi elemek között. Az adatátvitelt sorosan valósítja meg, egy szinkronizáló órajel (SCL – serial clock) és egy adatvezeték (SDA – serial data) segítségével. Mindkét sín úgynevezett open drain kialakítású. Ennek működési alapja, hogy a sánt alapállapotban egy referenciaszűltségre kötéssel logikai 1-es potenciálra hozzuk. Logikai 0 jel esetén a jelet kiadó eszköz a sánt leföldeli, logikai 1 jel esetén magas potenciálon hagyja azt. Ennek működéséhez minden eszközön szükség van úgynevezett pull-up ellenállásokra, melyek a sín potenciálját logikai 1 szintre hozzák. Fontos azonban, hogy abban az esetben, hogyha egy sínre sok eszköz csatlakozik (tehát a tervezett használat szerint jelen esetben is) ügyelni kell arra, hogy sántként csak egy darab pull-up ellenállás legyen. Ennek oka, hogy ellenkező esetben valamennyi pull-up ellenállás párhuzamosan kapcsolódik, így eredőjük kisebb ellenállás lesz a szabványban javasoltnál. Ez különösen alacsonyabb feszűltségű, például 3,3V-os jelszintek esetén képes a jelszintet a döntési küszöb közelébe hozni, ami működési zavart okozhat. Ennek a problémának az áthidalására az erősítőpanelen a pull-up ellenállásokat úgy terveztem, hogy azok igény esetén a sínről leválaszthatóak legyenek jumperek segítségével.

Az erősítőpanel az I2C protokoll 7-bites címtartományú verzióját használja. Ennek alapvető szekvenciája a következő:

1. A master eszköz egy START jelet küld a slave eszköznek
2. A master eszköz elküldi a slave eszköz 7 bites címét, a 8. biten pedig jelzi, hogy írási vagy olvasási ciklus következik
3. A slave eszköz a 8 bit után egy ACK jelet küld
4. Megkezdődik az írási vagy olvasási ciklus
5. A slave eszköz 8 bitenként küld egy ACK jelet
6. Az átvitel addig folytatódik, míg a master eszköz STOP jelet nem küld



6.2.1 ábra: általános I2C ciklus

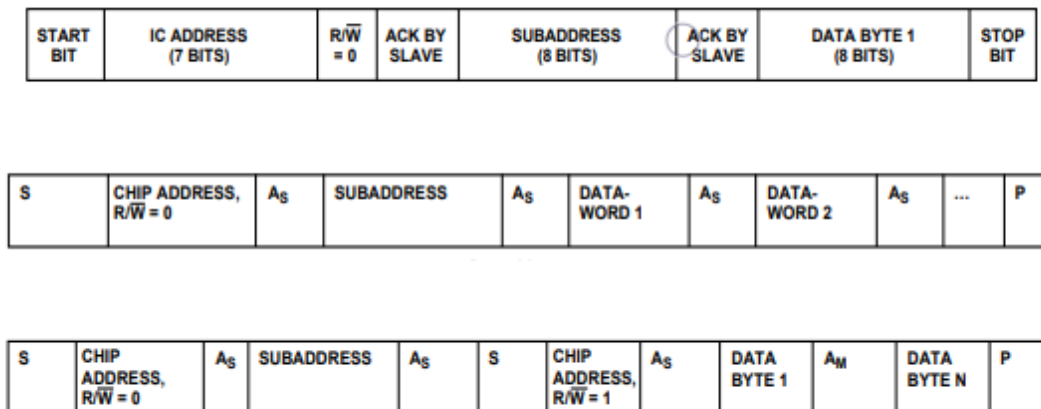
Az SSM3582 számtalan belső regiszterrel rendelkezik. Ezek mindegyike az eszközön belül fix, két byte-os címen (subaddress) érhető el. Mivel írási és olvasási ciklusoknál is specifikálni kell az eszköz számára az írni vagy olvasni kívánt regisztert, ezért az erősítő a következő módon konfigurálható:

- Egy darab regiszter írása esetén a master eszköz az erősítőnek két byte adatot küld. A küldött adat első byte-ja a subaddress-t jelöli meg az erősítő számára, második byte-ja pedig a subaddress által megjelölt regiszterbe írni kívánt adat.

- Több regiszter egyszerre történő konfigurálása esetén páros számú byte-okként közöljük az adatokat a fenti módszerhez hasonlóan. Minden byte-pár első tagja a subaddress, második tagja az írni kívánt adat. Az eszköz 7 bites címét csak az adatátvitel legelején közöljük.

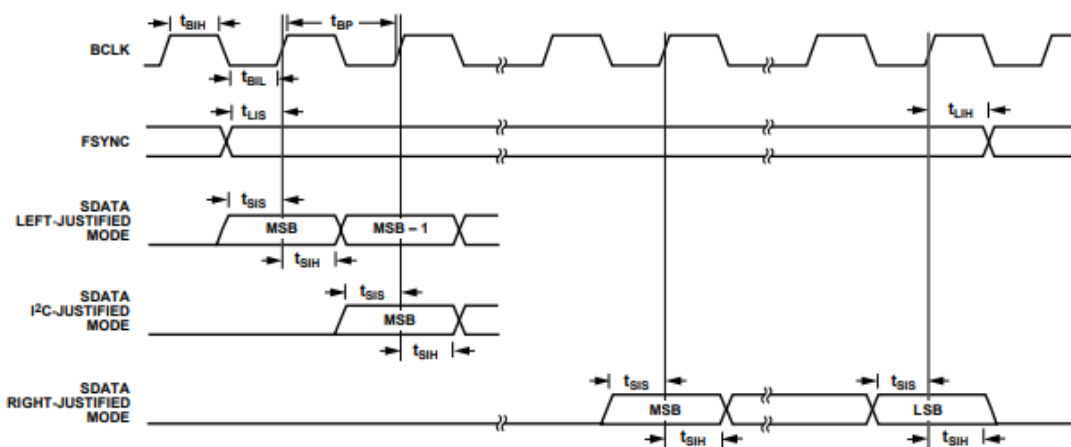
- Az olvasási folyamat két ciklusból áll. Első lépésben a master eszköz egy byte adatként elküldi az olvasni kívánt subaddress-t. Mivel nem érkezett második byte adat, az SSM3582 felismeri, hogy olvasási ciklus következik. Rögtön az írási ciklus befejezése után a master eszköz kezdeményez egy olvasási ciklust ugyanarról a címről, melyre a subaddress-t küldte. Az ezen a címen található erősítő ezután elküldi a megfelelő regiszter tartalmát.

Az írási és olvasási ciklusok menetét a 6.2.2 ábra mutatja.



6.2.2 ábra: I2C egy bites és több bites írási, valamint olvasási ciklus SSM3582 vezérlésére

Az I2S (Inter-IC Sound) protokollt szintén a Philips Semiconductor fejlesztette ki, 1986-ban lett szabványosítva [13]. A protokollt hanganyagok áramkörön belüli, rövid távú továbbítására fejlesztették ki. Az I2C protokollal ellentétben ez nem alkalmas kétirányú adatátvitelre, a master eszköz csak küldeni képes az adatokat, fogadni nem. Szintén különbség, hogy ez a protokoll 3 vezetéken keresztül végzi a kommunikációt a földpotenciált nem számolva. Ezek rendre a BCLK, LRC (/FSYNC) és SDATA vezetékek. Az SDATA (Serial Data) vezetéken érkezik az adat soros átvitelrel, az átvitelt a BCLK (BitClock) órajel szinkronizálja. Az LRC (Left/Right Control) jel olyan kereteket jelöl ki, amelyekben belüli bitek egy adat részei. Tipikusan kétcsatornás esetben ez a bal- és jobboldal számára küldött adatokat különíti el. A kereten belül az adat elhelyezése beállítható, ezeket nevezzük left-justified, right-justified és I2S-justified módoknak.



6.2.3 ábra: adatok időzítése az adatok elhelyezésének különböző módjai esetén

Az alapvető I2S protokoll módosított változatát abban az esetben használja az eszköz, amennyiben a sínre több, külön vezérelt eszköz csatlakozik. Ilyenkor a BCLK jel továbbra is a bitek szinkronizálására szolgál, az SDATA jel pedig az adatok soros átvitelét valósítja meg. Az LRC jel azonban a TDM keretek kezdetét jelzi, ezért hívja az eszköz gyártója ezt FSYNC (Frame Synchronizing) jelnek. Az FSYNC jel felfutóéle indikálja a következő TDM keret kezdetét, mely egy BCLK ciklusnyi szünettel később kezdődik. Az FSYNC jel egy BCLK ciklus idejére vesz csak föl logikai 1 értéket, a keret maradék részében értéke logikai 0.

6.3 A vezérlőjelek kiadásának programozása a választott célhardverrel

A vezérlés megvalósítására egy Arduino MKRZero típusú mikrokontrollert választottam. Ez képes I2C, illetve az I2S protokoll kétcsatornás verzióját kezelni, valamint adatot külső hordozóról (SD kártya) adatot olvasni, így az elkészült panelek működésének tesztelésére alkalmas.

Elsőként az I2C regiszterek elérését, írási és olvasási funkcióit valósítottam meg, ugyanis az I2S protokoll megfelelő működtetéséhez ezeken keresztül kellett a megfelelő beállításokat megadni. A megfelelő konfiguráció érdekében valamennyi regiszter tartalmát meghatároztam, a pontos konfigurációt a 5.3.1 ábra tartalmazza.

Cím - Érték - Reset value - Megjegyzés

| | | | |
|------|------------|--------|--|
| 0x00 | - xxxxxxxx | - 0x41 | - Vendor ID (read only) |
| 0x01 | - xxxxxxxx | - 0x35 | - Device ID1 (read only) |
| 0x02 | - xxxxxxxx | - 0x82 | - Device ID2 (read only) |
| 0x03 | - xxxxxxxx | - 0x01 | - Revision code (read only) |
| 0x04 | - 10010000 | - 0xA1 | - auto powerdownn, temperature sensor on, stereo mode, LR channel powered on |
| 0x05 | - 00001010 | - 0x8A | - dac low power off, polarity normal, low emi off, +19 dB |
| 0x06 | - 00000010 | - 0x02 | - soft vol ramping, LR unmuted, DAC HPF off, 32-48kHz sample rate |
| 0x07 | - 01000000 | - 0x40 | - L volume 0dB |
| 0x08 | - 01000000 | - 0x40 | - R volume 0dB |
| 0x09 | - 00010010 | - 0x11 | - BCLK rising edge mode, 32 bit TDM slot, low FSYNC is R, I2S format, stereo mode |
| 0x0A | - 00010001 | - 0x07 | - SDATA edge delay off, 16 bit data, independend HF clip bits, independent volume, use ADDRx pins to determine TDM slot |
| 0x0B | - 00000000 | - 0x00 | - L slot selection |
| 0x0C | - 00000001 | - 0x01 | - R slot selection |
| 0x0E | - 10100000 | - 0xA0 | - L limiter attack/release set, limiter off |
| 0x0F | - 01010001 | - 0x51 | - L limiter threshold, ratio |
| 0x10 | - 00100010 | - 0x22 | - L limiter battery voltage inflection point |
| 0x11 | - 10101000 | - 0xA8 | - R limiter attack/release set, limiter off |
| 0x12 | - 10100001 | - 0x51 | - R limiter threshold, ratio |
| 0x13 | - 00100010 | - 0x22 | - R limiter battery voltage inflection point |
| 0x14 | - 11111111 | - 0xFF | - L DAC HF Clip value 0 dB |
| 0x15 | - 11111111 | - 0xFF | - R DAC HF Clip value 0 dB |
| 0x16 | - 00100010 | - 0x00 | - LR over tmp reduction 3 dB (reset: 0dB) |
| 0x17 | - 00110000 | - 0x30 | - no manual recovery attempt, auto recoveries enabled |
| 0x18 | - xxxxxxxx | - 0x00 | - error status register (read only) |
| 0x19 | - xxxxxxxx | - 0x00 | - limiter status register (read only) |
| 0x1A | - xxxxxxxx | - 0x00 | - battery voltage readback (read only) |
| 0x1B | - xxxxxxxx | - 0x00 | - temp sensor value (read only) |
| 0x1C | - 00000000 | - 0x00 | - full software reset (no attempt) |

6.3.1 ábra: az I2C regiszterek megfelelő konfigurációja

Az I2C protokoll kezelésére a mikrokontroller a `Wire.begin()`, `Wire.beginTransmission(address)`, `Wire.endTransmission()`, `Wire.available()`, `Wire.write(data, numbytes)` és `Wire.requestFrom(address, numbytes)` függvényeket használja.

- A `Wire.begin()` függvény inicializálja a kapcsolatot, és csatlakoztatja az eszközt az I2C sínre.
- A `Wire.beginTransmission()` függvény megkezdí az adatok küldését a paraméterül megadott címre.
- A `Wire.endTransmission()` lezárja a kapcsolatot.

Fontos szempont, hogy a START és STOP biteket a mikrokontroller ezen függvények hatására adja ki, így a két függvény között küldött vagy fogadott adatok nem különülnek el, folytonos byte-okként kerülnek továbbításra. Amennyiben tehát szükség van a START és STOP bitek meglétére, ezen függvényeket kell használni.

- A kapcsolat felvétele után adatot a megadott címre a `Wire.write()` függvénnyel lehet, melynek paraméterül kell adni a küldeni kívánt adatot, és megadni a küldött byte-ok számát. Az inicializáló program írása során a subaddress-érték párokat egy-egy kételemű byte-tömbként kezeltem, a függvénynek pedig ezen tömböket adtam át.
- Adatot kérni a `Wire.requestFrom()` függvény segítségével lehetséges a megadott címről. Erre a slave eszköz alapértelmezetten az adat küldésével reagál.
- A slave eszköz elérhetőségét a `Wire.available()` függvény segítségével lehet, mely az elérhetőségnek megfelelő logikai értékkel tér vissza.

Elsőként a címtartomány ellenőrzését végző programot írtam meg. Ez szisztematikusan végigléptet az összes lehetséges I2C (7 bites) címen, minden cím esetén kiépít és lebont egy kapcsolatot, és ellenőrzi a kapcsolat sikerességét.

A pásztázás a mikrokontroller minden egyes loop ciklusában megtörténik, így lehetséges a program futása közben változtatni az eszközök címbeállításain, és ellenőrizni a változtatás sikerességét. A program forráskódját a függelék 1. pontja tartalmazza.

A cím ellenőrzése után a regisztereket konfiguráló programot írtam meg. Ez a program elején deklarált címre minden írható regisztert szisztematikusan a megadott adatokkal tölt fel. A program a `setup()` függvény meghívásakor egyszer fut le, eredményes voltát pedig a monitor ablakon jelzi. A program forráskódját a függelék 2. pontja tartalmazza.

A regiszterek tartalmának ellenőrzésére is külön programot írtam. Ez az SSM3582 specifikációinak megfelelő formátumban olvassa be a regiszterek tartalmát, azaz elsőként egy írási ciklus során megadja a kért subaddress címét, majd egy olvasási ciklust kezdeményez. A program minden regiszter tartalmát kiolvassa, és azokat az egyszerűség kedvéért bináris formában kiírja a monitor ablakba. A program forráskódját a függelék 3. pontja tartalmazza.

Az I2C protokoll és a regiszterek kezelését ezzel a 3 programmal végeztem.

A megfelelő beállítások elvégzése után az I2S protokoll tesztelésére volt szükség. Ehhez egy olyan programot írtam, mely egy megadott frekvenciájú és

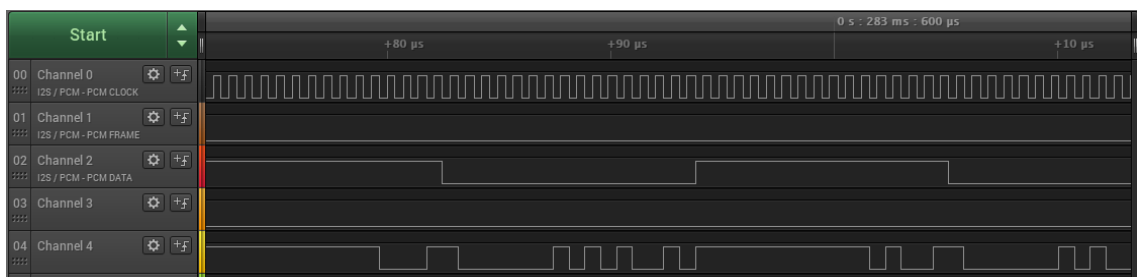
amplitúdójú négyszögjelet generál, melyet az I2S protokollon továbbít. A program forráskódját a függelék 4. pontja tartalmazza.

A vezérlés megvalósítására választott mikrokontroller a regiszterek kezelését megfelelően végzi, azonban időmultiplexált I2S jelek kiadására nem alkalmas. A mikrokontroller elérhető programkönyvtárai nem teszik lehetővé továbbá az SD kártyáról olvasott hanganyag (az erősítőnek) megfelelő formátumú lejátszását sem, így az erősítőpanel ezt nem képes fogadni. A mikrokontroller szintetizált jelek kiadására alkalmas egy darab erősítő számára. Ez megfelelő lehet a működőképesség ellenőrzésére és mérési célokra.

6.4 A vezérlőjelek mérése

A vezérlőjelek megfelelő programozása után következő feladatomban a jelek helyességének ellenőrzése volt. Az I2C protokoll esetében a fizikai jel mérésére nem volt szükség, az átvitel sikerességét ellenőrizni lehetett a regiszterértékek írás utáni olvasásával. I2S protokoll esetében azonban sok esetben ellenőrizni kellett a mikrokontroller működését úgy is, hogy az erősítő (különböző okokból, pl hibás konfiguráció vagy chiphiba) nem adott ki jelet. A BCLK és LRC jelek periodikus négyszögjelek, így ezek mérése oszcilloszkóppal lehetséges, azonban így az átvitt adat értékének ellenőrzésére nincs mód.

Ezen okokból a mérések során oszcilloszkóp helyett erre a célra tervezett logic analyzert használtam. Ez az eszköz nagy frekvenciával egyszerre mintavételezi mindhárom jelet, a mért adatokat pedig szoftveresen dolgozza fel, lásd 6.4.1 ábra. A szoftverben beállítható a kommunikáció protokollja, így az nem csupán a mért jeleket képes megjeleníteni, de a protokoll ismeretében az átvitt adatot is. Így ellenőrizhető az I2S jelek helyessége is abban az esetben, ha az erősítő kiadott jele nem mérhető valamilyen okból.



6.4.1 ábra: a mért I2S jelek (44,1 kHz-es mintavételezés és 16 bit-es minták esetén)

A 0. csatornán (Channel 0) látható a BCLK órajel, amelynek minden ciklusa egy-egy küldött bitet jelez. Az erősítő jelen beállítások mellett felfutóéltre mintavételez.

A 2. csatornán (Channel 2) az LRC jel figyelhető meg. Ez jelöli ki a jobb és bal csatornának küldött jeleket. Megfigyelhető, hogy a jel éppen 16 órajel ciklusonként vált, mert az átküldött adatok 16 bitesek.

A 4. csatornán (Channel 4) az SDATA jelet láthatjuk, melynek értéke az átvitt adattól függ.

Megfigyelhető, hogy mind az SDATA, mind az LRC jel lefutóéltre vált, ezzel elkerülve azt, hogy a mintavételezés során téves legyen az adat.

A mérési eredmény alapján kijelenthető, hogy a protokollnak megfelelően történik az adatok átvitele.

A generált négyszögjel esetében lehetőség volt a kimenet közvetlen mérésére oszcillószköppal, illetve a kimenetre kötött hangszóróval is. Mindkét esetben az elvártnak megfelelő jelalakot kaptunk, tehát az erősítőpanel működőképes.

7 Összefoglalás

A hangtársintézis rendszer gyakorlati megvalósítása számos problémát vet fel, melyek egy része eliminálható, sok esetben azonban kompromisszumot kell kötni. Ez legfőképpen a hangszóró mérete esetén kritikus.

Az elméleti megfontolások figyelembevételével sikerült olyan elrendezést találni, amely képes lehet a térbeli átlapolódás jelenségére elégséges megoldást nyújtani. A rendszer megvalósítása során a jelenleg kapható hangszórók közül kiválasztottam 4 megfelelőnek tűnőt, melyek viselkedésének modellezése segítségével választottam ki a legjobbat közülük. Ehhez olyan hangládát terveztem, melynek mérete maximális lapos átvitelt eredményez, geometriája pedig alkalmassá teszi hangtársintézisre.

A hangszórósokaság meghajtására kompakt erősítőáramkört terveztem, melyek vezérlése lehetséges egy közös digitális sínen, időmultiplexált jellel. Az áramkör konfigurációját és működőképességének tesztelését egy mikrokontroller segítségével végeztem. A tesztelés során az erősítő konfigurációját teljes mértékben sikerült megvalósítani, a működőképesség ellenőrzését pedig egy generált négyszögjel kiadásának segítségével valósítottam meg, melyet a kimeneten megfelelően mérni lehetett.

Az erősítőpanelek működésének ellenőrzése sikeres volt, azonban további teendő még az erősítőket vezérlő digitális multiplexált jel előállítására tetszőleges (nem szintetizált) jelből. Erre a mikrokontroller nem alkalmas, így megfelelő célhardvert is szükséges választani. Meg kell valósítani továbbá a vezérlőjelek csatornánkénti előállítását és digitális előszűrését is.

Irodalomjegyzék

- [1] Berkhout, A.J.: A Holographic Approach to Acoustic Control, Journal of the Audio Eng.Soc., vol. 36, December 1988, pp. 977–995 Wikipedia: Evaluation strategy, http://en.wikipedia.org/wiki/Evaluation_strategy
- [2] Firtha Gergely: A Generalized Wave Field Synthesis Framework, Ph.D. Thesis, 2019, 4:77-78, http://last.hit.bme.hu/download/firtha/Dissertation/firtha_phd_thesis.pdf
- [3] Rakota Szabolcs: Hangtérszintézis kompatibilis hangszóródoboz megvalósítása és kompenzációja, szakdolgozat, 2018, 21-22
- [4] Rakota Szabolcs: Hangtérszintézis kompatibilis hangszóródoboz megvalósítása és kompenzációja, szakdolgozat, 2018, 21-22
- [5] Dr Márki Ferenc által lektorált hallgatói jegyzet, 2018, 26, https://vik.wiki/images/b/be/Hangtechnika_jegyzet_2017.pdf
- [6] Firtha Gergely, Rucz Péter: Elektroakusztikai átalakítók vizsgálata, tanszéki jegyzet, 5, http://last.hit.bme.hu/sites/default/files/documents/atalakitok_leiras_0.pdf
- [7] Dr Augusztinovicz Fülöp, Hangszórók, hangsugárzók, Mérnöki Akusztika oktatási segédlet, 2014, 18, http://last.hit.bme.hu/download/fulop/MernokiAkusztika_14/Hangszorok-sugarzok.pdf
- [8] Firtha Gergely, Rucz Péter: Elektroakusztikai átalakítók vizsgálata, tanszéki jegyzet, 6, http://last.hit.bme.hu/sites/default/files/documents/atalakitok_leiras_0.pdf
- [9] Firtha Gergely, Rucz Péter: Elektroakusztikai átalakítók vizsgálata, tanszéki jegyzet, 6, http://last.hit.bme.hu/sites/default/files/documents/atalakitok_leiras_0.pdf
- [10] Rakota Szabolcs: Hangtérszintézis kompatibilis hangszóródoboz megvalósítása és kompenzációja, szakdolgozat, 2018, 33
- [11] Az erősítő gyártó által közölt adatlapja: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/SSM3582.pdf>
- [12] A protokoll pontos szabványát tartalmazó dokumentum: UM10204 I 2C-bus specification and user manual, 2014 revisited, <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>

További információk: <https://hu.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>

[13] A protokoll pontos szabványát tartalmazó dokumentum: Philips Semiconductors - I2S bus specification, 1986 február,
<https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/I2SBUS.pdf>

További információk: <https://en.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2S>

Függelék

1. Az I2C protokoll elérhető eszközeit listázó program

```
#include<Wire.h>

void setup()
{
  Wire.begin();
  delay(10000); //wait for the serial monitor to connect
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("\nI2C Scanner");
}

void loop()
{
  byte error, address;
  int nDevices;

  Serial.println("Scanning...");

  nDevices = 0;
  for(address = 1; address < 127; address++ )
  {

    Wire.beginTransmission(address);
    error = Wire.endTransmission();

    if (error == 0) //if the connection was succesful
    {
      Serial.print("I2C device found at address 0x");
      if (address<16)
        Serial.print("0");
      Serial.print(address,HEX);
      Serial.println(" !");
      nDevices++;
    }
    else if (error==4) //if there was a response, but the connection failed
    {
      Serial.print("Unknow error at address 0x");
      if (address<16)
        Serial.print("0");
      Serial.println(address,HEX);
    }
  }
  if (nDevices == 0)
    Serial.println("No I2C devices found\n");
  else
    Serial.println("done\n");
  delay(5000);          // wait 5 seconds for next scan
}
```

2. Az I2C regisztereket konfiguráló program

```
#include<Wire.h>

int address = 0x1E;

byte reg04[2] = {0x04, B10010000}; // auto pwn, tmp sensor on, stereo, LR
channel powered on
byte reg05[2] = {0x05, B00001010}; // dac low power off, polarity normal,
low emi off, +19 dB
byte reg06[2] = {0x06, B00000010}; // soft vol ramping, LR unmuted, DAC HPF
off, 32-48kHz
byte reg07[2] = {0x07, B01000000}; // L 0dB
byte reg08[2] = {0x08, B01000000}; // R dB
byte reg09[2] = {0x09, B00010010}; // BCLK rising edge mode, 32 bit TDM
slot, low FSYNC is R, I2S left justif format, stereo mode
byte reg0A[2] = {0x0A, B00010001}; // SDATA edge delay off, bit, independend
HF clip bits, independent volume, use ADDRx pins to determine TDM slot
byte reg0B[2] = {0x0B, B00000000}; // L slot selection
byte reg0C[2] = {0x0C, B00000001}; // R slot selection
byte reg0E[2] = {0x0E, B10100000}; // L limiter attack/release set, limiter
off
byte reg0F[2] = {0x0F, B01010001}; // L limiter threshold, ratio
byte reg10[2] = {0x10, B00100010}; // L limiter battery voltage inflection
point
byte reg11[2] = {0x11, B10101000}; // R limiter attack/release set, limiter
off, separate channel limiters
byte reg12[2] = {0x12, B10100001}; // R limiter threshold, ratio
byte reg13[2] = {0x13, B00100010}; // R limiter battery voltage inflection
point
byte reg14[2] = {0x14, B11111111}; // L DAC HF Clip value 0 dB
byte reg15[2] = {0x15, B11111111}; // R DAC HF Clip value 0 dB
byte reg16[2] = {0x16, B00100010}; // LR over tmp reduction 3 dB
byte reg17[2] = {0x17, B00110000}; // no manual recovery attempt, auto
recoveries enabled (temp, undervoltage, overcurrent)
byte reg1C[2] = {0x1C, B00000000}; // full software reset off

void setup() {
    delay(1000); //wait for serial monitor
    Serial.begin(9600);
    Wire.begin();
    Serial.println("Configuring I2C registers...");

    Wire.beginTransmission(address);
    if(Wire.write(reg04, 2)!=2) Serial.println("Register 04 initializaton
failed");
    Wire.endTransmission();

    Wire.beginTransmission(address);
    if(Wire.write(reg05, 2)!=2) Serial.println("Register 05 initializaton
failed");
    Wire.endTransmission();

    Wire.beginTransmission(address);
    if(Wire.write(reg06, 2)!=2) Serial.println("Register 06 initializaton
failed");
    Wire.endTransmission();
}
```

```
Wire.beginTransmission(address);
if(Wire.write(reg07, 2)!=2) Serial.println("Register 07 initializaton
failed");
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(address);
if(Wire.write(reg08, 2)!=2) Serial.println("Register 08 initializaton
failed");
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(address);
if(Wire.write(reg09, 2)!=2) Serial.println("Register 09 initializaton
failed");
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(address);
if(Wire.write(reg0A, 2)!=2) Serial.println("Register 0A initializaton
failed");
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(address);
if(Wire.write(reg0B, 2)!=2) Serial.println("Register 0B initializaton
failed");
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(address);
if(Wire.write(reg0C, 2)!=2) Serial.println("Register 0C initializaton
failed");
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(address);
if(Wire.write(reg0E, 2)!=2) Serial.println("Register 0E initializaton
failed");
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(address);
if(Wire.write(reg0F, 2)!=2) Serial.println("Register 0F initializaton
failed");
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(address);
if(Wire.write(reg10, 2)!=2) Serial.println("Register 10 initializaton
failed");
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(address);
if(Wire.write(reg11, 2)!=2) Serial.println("Register 11 initializaton
failed");
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(address);
if(Wire.write(reg12, 2)!=2) Serial.println("Register 12 initializaton
failed");
Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(address);
if(Wire.write(reg13, 2)!=2) Serial.println("Register 13 initializaton
failed");
Wire.endTransmission();
```

```
Wire.beginTransmission(address);
  if(Wire.write(reg14, 2)!=2) Serial.println("Register 14 initializaton
failed");
  Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(address);
  if(Wire.write(reg15, 2)!=2) Serial.println("Register 15 initializaton
failed");
  Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(address);
  if(Wire.write(reg16, 2)!=2) Serial.println("Register 16 initializaton
failed");
  Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(address);
  if(Wire.write(reg17, 2)!=2) Serial.println("Register 17 initializaton
failed");
  Wire.endTransmission();

Wire.beginTransmission(address);
  if(Wire.write(reg1C, 2)!=2) Serial.println("Register 1C initializaton
failed");
  Wire.endTransmission();

Wire.endTransmission();

Serial.println("Registers configured");
}

void loop(){
  while(1);
}
```

3. Az I2C regiszterek tartalmát beolvasó program

```
#include<Wire.h>

int address = 0x1E; //the fix address of the chip which we would like to
read

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();
  Serial.println("Reading I2C registers...");
}

void loop() {
  delay(9000); //for the serial monitor
  byte curraddress= 0x01;
  while(curraddress < 0x1D){

    Wire.beginTransmission(address);
    Wire.write(curraddress);
    Wire.endTransmission(); //I2C write sequence with the subaddress

    Wire.requestFrom(address, 1);
    if(!Wire.available()) Serial.println("Device unavailable");
    char currcontent = Wire.read(); //I2C read sequence
    Serial.println("Address: ");
    Serial.print(curraddress, HEX);
    Serial.println('\n');
    Serial.println("Value: ");
    Serial.println(currcontent, BIN);
    Serial.println('\n');
    curraddress++;
  }
  while(1); //stop the program after 1 cycle
}
```


4. Az I2S protokollon küldött négyszögjelet generáló program

```
#include<I2S.h>
#include<Wire.h>

//Squarewave specifications
const int frequency = 440; // frequency of square wave in Hz
const int amplitude = 500; // amplitude of square wave
const int sampleRate = 96000; // sample rate in Hz

const int halfWavelength = (sampleRate / frequency); // half wavelength of
square wave

short sample = amplitude; // current sample value
int count = 0;

void setup() {
  delay(10000);

  Serial.begin(9600);
  Serial.println("I2S squarewave test");
  Serial.println("Frequency:");
  Serial.print(frequency);
  Serial.println("Amplitude:");
  Serial.print(amplitude);

  // start I2S at the sample rate with 16-bits per sample, in left-justified
mode
  if (!I2S.begin(I2S_LEFT_JUSTIFIED_MODE, sampleRate, 16)) {
    Serial.println("Failed to initialize I2S!");
    while (1); // do nothing
  }
}

void loop(){
  if (count % halfWavelength == 0) {
    // invert the sample every half wavelength count multiple to generate
square wave
    sample = -1 * sample;
  }

  // write the same sample twice, once for left and once for the right
channel
  I2S.write(sample);
  I2S.write(sample);

  if(count==2*halfWavelength){count=0;} //to prevent the variable from
overflowing
  count++; // increment the counter for the next sample
}
```