

Épületek akusztikai modellezése reverberátorok felhasználásával

Modelling the acoustics of buildings using reverberators

TOMA Norbert, Dr. TOPA Marina, SZOPOS Erwin
Kolozsvári Műszaki Egyetem

Abstract

Artificial reverberation is used in different domains from cinematography to psychology. Important applications are the production of special effects, the enhancement of room's acoustical properties. The goal of the paper is to present the reverberation phenomenon, the description of some early and late reverberation algorithms using their classical and improved types, as well as their design and simulation using a real room. The behavior of the reverberators is simulated using MATLAB/SIMULINK.

Összefoglaló

A mesterséges reverberációt különböző területeken használják, a filmipartól egészen a pszichológiáig. Ennek mindennapi alkalmazása a különleges effektusok elérése, egyes termek akusztikájának javítása.

A dolgozat célja a reverberációval kapcsolatos jelenségek bemutatása, a korai és késői reverberációs algoritmusok, ezek klasszikus és javított változatának tervezése és szimulációja egy konkrét zárt helyiség esetében. A reverberátorok működését a MATLAB/SIMULINK környezetben lehet igen eredményesen szimulálni.

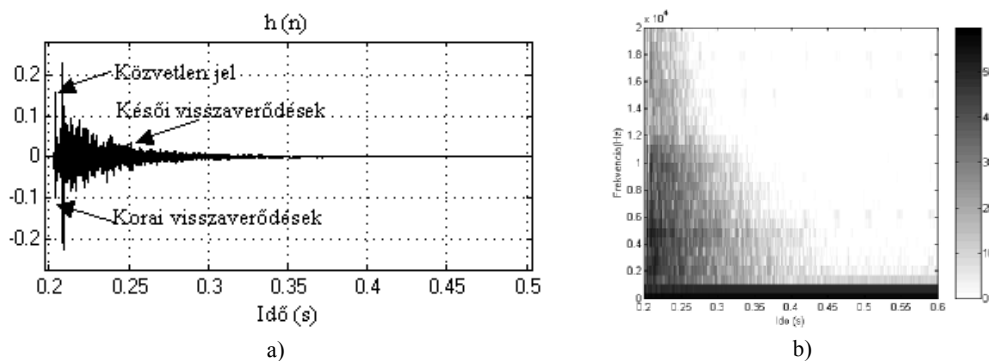
Kulcsszavak: reverberátor, korai reverberáció, késői reverberáció, spektrogram, impulzusválasz, aluláteresztő szűrő

1. Bevezető

A reverberáció egy nagyon általános jelenség, és része a mindennapi életünknek. Például, egy koncertterem vagy egy iroda falai, az utcán lévő épületek falai, minden körülöttünk lévő tárgy visszaveri a hangot, amely a térben terjed.

A reverberáció egy hang keletkezésével kezdődik egy zárt helyiségben. Az akusztikai hullámok a falakkal, a plafonnal és más felületekkel ütköznek, ahol az energia elnyelődik és visszaverődik. A visszaverődött energiát nevezzük reverberációnak. Amennyiben közvetlen összeköttetés van a forrás és a hallgató között, akkor a hallgató először a *közvetlen hangot* hallja és csak ez után a közelében lévő felületek hang visszaverődését, ezeket nevezzük *korai visszaverődéseknek* (1.a ábra). Ezt követően a visszaverődött hullámok száma fokozatosan növekszik, miközben ezek amplitúdója csökken, ezt jellemzi egy sűrű visszhang kollekció, melyek intenzitása független attól, hogy a hallgató a helyiség mely pontján helyezkedik el. Ezeket a hullámokat nevezzük *késői visszaverődéseknek*. A mesterséges reverberáció egy jó minőségű akusztikával rendelkező helyiség (katedrális, koncertterem) teljesítményét (akusztikáját) próbálja utánozni (modellálni). Ez egy korai és késői reverberátor összekapcsolásából áll.

Azt az időt, amely ahhoz szükséges, hogy a hangnyomás szintje csökkenjen 60 dB-t az eredeti értékéből, *reverberációs időnek* nevezzük. Az elnyelésnek köszönhetően a reverberációs idő változik a frekvencia függvényében; például a falak sokkal inkább a nagy frekvenciákat nyelik el, mint a kicsiket. Egy helyiség reverberációja általában a megfelelő *impulzusválasszal* jellemezhető. Az 1.a ábra bemutatja egy konkrét helyiség megmért impulzusválasztát.



1. ábra
Egy tömbházlakás:
a) impulzusválasza; b) spektrogramja.

Látható, hogy a korai reverberáció tartalmazza az exponenciálisan csökkenő szétszóródó (diffúz) komponenseket [3]. Ezt a jelleget a klasszikus mesterséges korai reverberációs algoritmus teljesen figyelmen kívül hagyja. A késői reverberáció egy csökkenő, nagy sűrűséggel rendelkező impulzus-csoportból áll, amelyet nagymértékben befolyásolnak a falak felépítéséhez használt anyagok, akár csak a helyiségben lévő tárgyak.

Az impulzusválasznak csupán az a hátránya, hogy a helyiség frekvencia összetételére vonatkozó információt nem tartalmaz. Egy tökéletesebb ábrázolási módszert, amely figyelembe veszi nem csak az amplitúdóra vonatkozó információkat, de a frekvenciára vonatkozókat is, spektrogramnak (színképfelvételnek) nevezzük. A spektrogram kirajzolására a STFT-t (Short Time Fourier Transform) használják. A STFT, más néven idő dependens FT (Fourier Transform), egy $x[n]$ bemeneti szekvenciára (jelre) a következőképp határozható meg:

$$X_{STFT}(e^{j\omega}, n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[n-m] \cdot w[m] \cdot e^{-j\omega n}, \quad (1)$$

Ahol $w[n]$ egy megfelelően választott ablak szekvencia. Fontos kihangsúlyozni, hogy az ablak funkciói közé tartozik, hogy az $x[n]$ szekvenciának egy jól meghatározott részét kiemeli (kivonja), oly módon, hogy a kiemelt résznek a spektrális jellemvonásai (karakterisztikái) megközelítőleg változatlanok az ablak időtartama alatt gyakorlati célok végett.

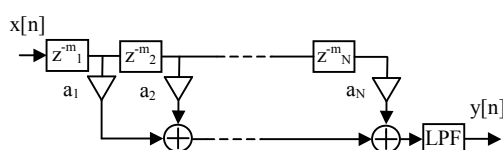
A konvencionális DTFT-től eltérően, az STFT két változóval rendelkező függvény: az n egész változó idő index és a folyamatos frekvencia-változó ω .

A legtöbb alkalmazásban (mint ahogy a mi esetünkben is), a STFT amplitúdója is a figyelem középpontjában áll. Általában az STFT amplitúdójának a kirajzolására a spektrogrammot használják. Ennek ellenére, mivel az STFT egy, két változóval rendelkező funkció, az amplitúdó kirajzolása 3 dimenziót igényel. Gyakran két dimenzióban rajzolják ki és a kirajzolás színskálája jelenti az amplitúdót. Ez esetben a fehér terület jelenti a nulla értékű amplitúdót, míg a szürke rész a nem nulla értékűt. A legmagasabb fokú amplitúdót a fekete szín jelzi. Az STFT amplitúdó ábráján a függőleges tengely jelzi a változó frekvenciát (ω), míg a vízszintes az idő indexet (n). Az 1.b ábra a fent említett tömbház spektrogramját mutatja be.

A dolgozat második része egy korai reverberációs algoritmust mutat be. A harmadik rész pedig klasszikus és feljavított késői reverberátorokat ismertet. Ezeknél az algoritmusoknál az akusztikára vonatkozó előnyöket és hátrányokat emeltük ki.

2. Schroeder típusú korai reverberátor

A korai impulzusválasz kevés atenuált impulzust tartalmaz, tehát egy FIR szűrővel lehet kivitelezni. A 2-es ábra mutatja be a Schroeder típusú struktúrát.



2. ábra
A Schroeder típusú korai reverberátor blokkvázlata

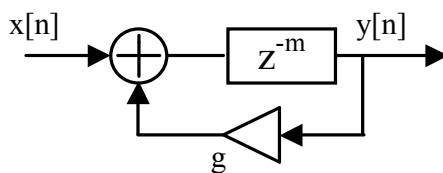
A szűrő egy sorozat-késleltető cellát (m_i), kivezetett erősítéseket (a_i) és egy alul áteresztő szűrőt (LPF) tartalmaz, ez utóbbi a hang minőségének javítására szolgál. A késleltető idő 10 és 80 milliszekundum között van, viszont nincsen semmilyen törvény, amely szerint megválaszthatnánk a kivezetések erősítéseit (a_i) és az alul áteresztő szűrő vágófrekvenciáját.

3. Késői reverberátorok

3.1. Schroeder típusú késői reverberátor

Schroeder az első digitális reverberátort több mint 30 évvel ezelőtt dolgozta ki. A reverberátort egy rekurzív struktúrára alapozta, amely párhuzamos fésűsszűrőket (comb filters) és két, mindent áteresztő szűrőt tartalmaz, amelyek soros kötésben helyezkednek el.

A fésűsszűrőt a 3-as ábra mutatja be. Ez egy olyan késleltető cellából áll, amelynek a kimenetele a bemenetelhez van visszacsatolva.



3. ábra
A fésűsszűrő blokkvázlata

A fésűsszűrőt az átviteli függvény a következőképpen határozza meg:

$$H(z) = \frac{z^{-m}}{1 - g \cdot z^{-m}} \quad (2)$$

és ennek az impulzusválasza a következő:

$$h[n] = \begin{cases} g^{k-1}, & n = km, k > 0 \\ 0, & \text{másként} \end{cases} \quad (3)$$

A (3) rendszerből a reverberációs időt a következőképpen lehet meghatározni:

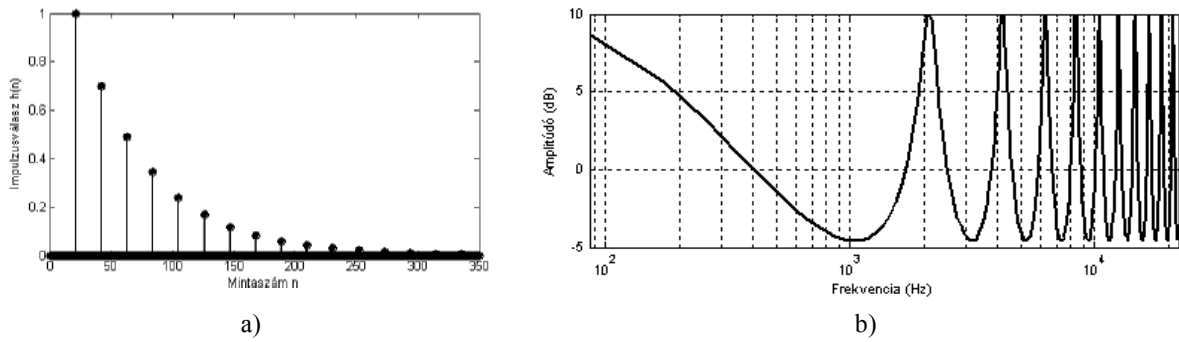
$$g = 10^{-3m \frac{T}{T_r}}, \quad (4)$$

ahol a T a mintavételi periódus.

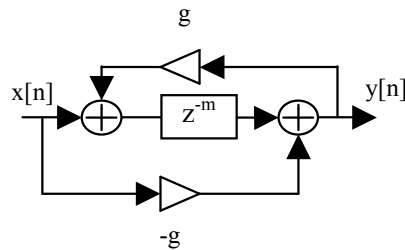
E szűrőnek az impulzusválasza egy exponenciálisan csökkenő impulzus-sorozat, melyek közötti távolság m mintának megfelelő (4.a ábra). A frekvenciaválasz hasonló egy fésűhöz, melynek csúcsai m -el periodikusak. Az előbb említett ábrák esetében $m = 21$ és $g = 0.7$.

Mivel a magas frekvenciák esetében az amplitúdó nem csökken (4.b ábra), zavaró fémhatású hang keletkezik [8], [9].

A fésűsszűrőt könnyen meg lehet változtatni, hogy egy sima frekvenciaválaszt kapjunk, így az eredmény egy mindent áteresztő szűrő (5. ábra).



4. ábra
A fésűszűrő: a) impulzusválasza; b) frekvencia-jelleggörbéje.



5. ábra
A mindent áteresztő szűrő blokkvázlata

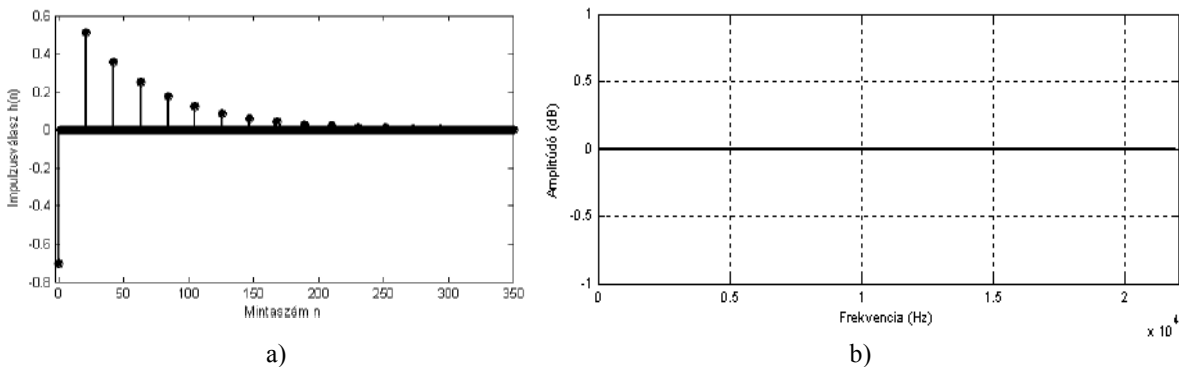
Az 5-ös ábrán bemutatott mindent áteresztő szűrőnek az átviteli függvénye a következő:

$$H(z) = \frac{z^{-m} - g}{1 - g \cdot z^{-m}} \quad (5)$$

és az impulzusválasza így határozható meg:

$$h[n] = \begin{cases} -g, & n = 0 \\ g^{k-1}(1 - g^2), & n = km, k > 0. \\ 0, & \text{másként} \end{cases} \quad (6)$$

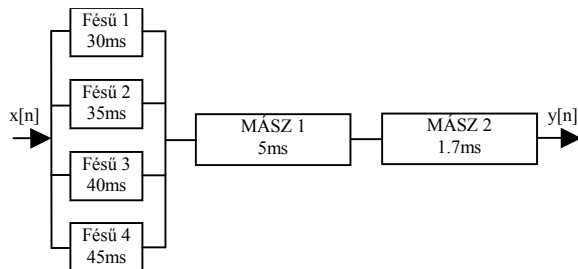
E szűrőnek az impulzusválasza egy exponenciálisan csökkenő impulzus-sorozat (kivévelt képez az első impulzus, amely negatív), melyek közötti távolság m mintának megfelelő (6.a ábra). A frekvenciaválasz teljesen sík (lapos), tehát minden egyes frekvenciát egyformán „áterszt” (6.b ábra). Az előbb említett ábrák esetében $m = 21$ és $g = 0.7$.



6. ábra
A mindent áteresztő szűrő: a) impulzusválasza; b) frekvencia-jelleggörbéje

A fésűszűrők hosszan tartó csillapodást idéznek elő, míg a mindent áteresztő szűrők megsokszorozzák a párhuzamos fésűszűrők kimeneteléről származó visszhangok (impulzusok) számát [1], [5], [8], [9].

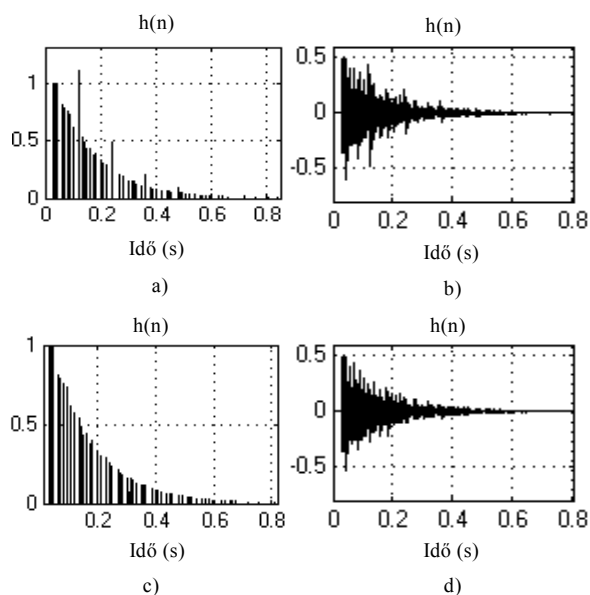
A Schroeder típusú reverberátort a 7-es ábra mutatja be. A rezgésmód sűrűsége kicsi és hallható impulzus üttetést tartalmaz (8.a ábra). Egy keskenysávú jel két szomszédos rezonáns frekvenciát (módbeli frekvenciát) gerjeszt, ezek a két frekvenciaérték különbségének megfelelő értékkel fognak üttetni. Ahhoz, hogy ezt a problémát enyhíteni tudjuk, a fésűszűrő késleltető celláit enyhén módosítani kell. Az egyik leghatásosabb eljárás a prím késleltető cellák választása. Így a zavaró csúcsok eltűnnek (8.c ábra).



7. ábra
A Schroeder típusú késői reverberátor blokkvázlata

A Schroeder típusú reverberátor hátrányai a következők:

- A visszhangok sűrűsége nem elégséges és ennek nem tapasztalható időbeni növekedése;
- Hosszantartó reverberációs idő esetében fémhatású hangok keletkeznek;
- A reverberációs idő és a frekvencia között nem lehet semmiféle kapcsolatot teremteni.



8. ábra
A párhuzamos struktúra impulzusválasza (a, c) és a reverberátor kimenetele (b, d) tervezett (a, b) és módosított (c, d) értékekkel.

3.2 A Gardner reverberátor

Gardner egymásba illesztett, mindent áteresztő szűrőkre alapozva állította össze a reverberátorokat. Ezeknek a szűrőknek az esetében a késleltető cellát egy sorozatba kötött késleltető cellával és egy mindent áteresztő szűrővel helyettesítette (9.a ábra).

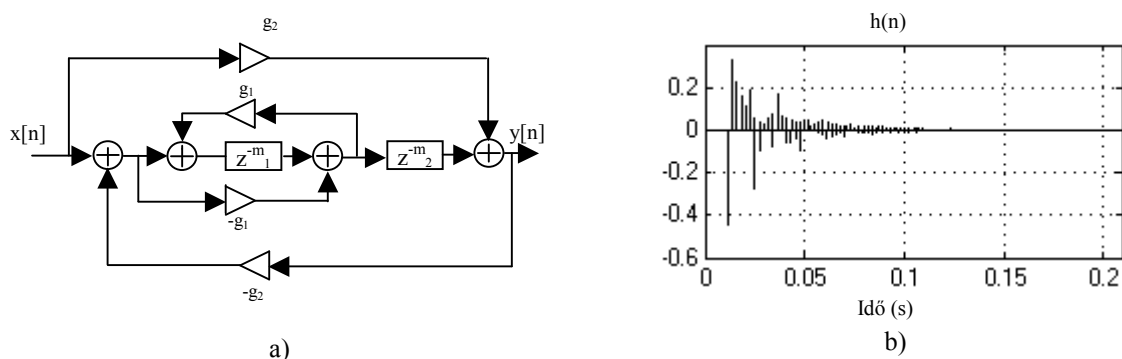
Egy mindent áteresztő struktúrának az előnye a szűrt jel időtartományban való ábrázolásakor figyelhető meg. Az ilyen típusú szűrők egy visszacsatolást tartalmaznak, amellyel a kimenőjel ponderáltan (súlyozottan) visszakérül a bemenetre. A visszhangok sűrűsége az idővel arányosan növekszik, amint az a 9.b ábrán látható. A mindent áteresztő szűrők másik előnye az, hogy a kaszkádkapcsolású szűrők számától függetlenül a frekvenciaválasz változatlanul ugyanaz: mindent áteresztő.

A 9.a ábra szerint a rendszer átviteli függvénye a következő:

$$H(z) = \frac{-g_2 + g_1 g_2 z^{-m_1} - g_1 z^{-m_2} + z^{-(m_1+m_2)}}{1 - g_1 z^{-m_1} + g_1 g_2 z^{-m_2} - g_2 z^{-(m_1+m_2)}} \quad (7)$$

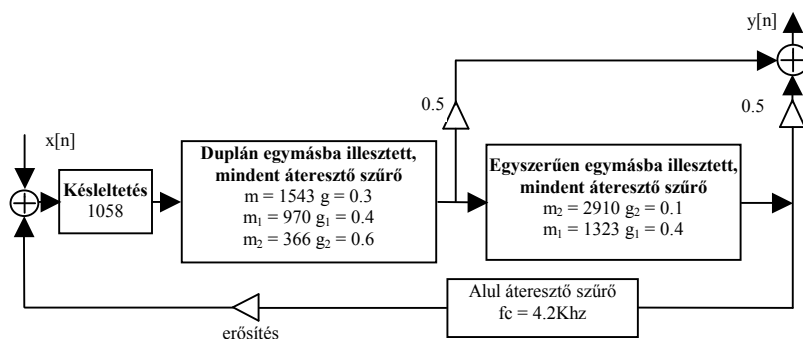
Gardner három struktúrát dolgozott ki különböző méretű helyiségekre [6], [7]. A 10-es ábra a kisebb helyiségekre tervezett reverberátorok struktúráját mutatja be.

A bemeneti jel áthalad a kaszkádkapcsolású, mindent áteresztő szűrőkön, amely után ponderáltan visszacsatolódik egy alul áteresztő szűrőn keresztül a bemenethez. Amikor a szűrő kimeneteleit megfelelő késleltetéssel visszacsatolják a bemenetelhez, a fémhatású hang nagymértékben lecsökken. A kimenetel a mindent áteresztő kimenetek lineáris kombinációjából áll.



9. ábra

a) Az egymásba illesztett, mindent áteresztő szűrő blokkvázlata; b) Az impulzusválasz.



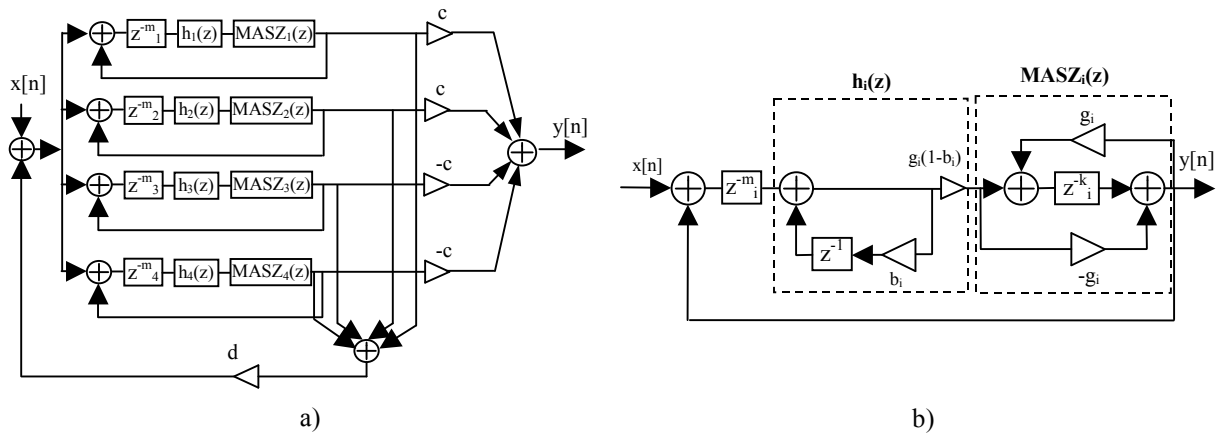
10. ábra

A Gardner típusú késői reverberátor blokkvázlata kisebb helyiségekre

3.3. Módosított Schroeder típusú késői reverberátor

E reverberációs algoritmusnak a blokkvázlatát a 11.a ábra mutatja be [4], [11], [13], [14].

Az algoritmus minden csatornája tartalmaz egy késleltető cellát ($z^{-m_1}, \dots, z^{-m_4}$), egy elnyelő szűrőt ($h_1(z) \dots h_4(z)$) és egy mindent áteresztő szűrőt ($MASZ_1(z), \dots, MASZ_4(z)$). A csatorna kimenetele visszacsatolódik a saját és a többi csatorna bemeneteléhez [4]. Minden egyes elnyelő szűrő, amely a késleltető cella után helyezkedik el, a frekvenciafüggő reverberációs időt szabályozza. Egy csatorna részletes blokkvázlatát a 11.b ábra mutatja be.



11. ábra

A módosított Schroeder típusú késői reverberátor: a) blokkvázlata; b) egyetlen csatornájának blokkvázlata

A szűrő amplitúdója egyenesen arányos a késleltető cella hosszával és fordítottan arányos a reverberációs idővel:

$$20 \log |h_i(e^{j\omega})|_{dB} = \frac{-60 \cdot m_i \cdot T}{T_r(\omega)} \quad (8)$$

Az elnyelő szűrőket a reverberációs idő és frekvencia függvényében tervezik meg, spektrogrammok segítségével. Alacsonyabb rendű szűrőket használnak:

$$h_i(z) = g_i \frac{1 - b_i}{1 - b_i \cdot z^{-1}} \quad (9)$$

ahol a g_i a reverberációs időt kis frekvenciákon, és a b_i nagy frekvenciákon határozza meg.

$$g_i = 10^{-\frac{3m_i \cdot T}{T_r(0)}}; \quad (10)$$

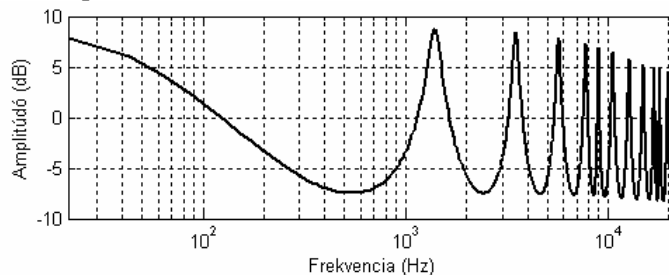
$$b_i = \frac{\ln(10)}{4} \cdot \log(g_i) \left(1 - \frac{1}{\alpha^2}\right); \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{T_r(\pi)}{T_r(0)}, \quad (12)$$

ahol a $Tr(0)$ a reverberáció időtartamát kis illetve a $Tr(\pi)$ nagy frekvenciák esetén határozza meg.

Egyetlen csatorna frekvencia-jelleggörbéje a 12-es ábrán látható.

Szemmel láthatóan a rezonáns frekvencia-csúcsok csökkennek az elnyelő (alul átteresztő) szűrőnek köszönhetően, akárcsak egy valós épület esetében. Ezért a fémhatás csökken.

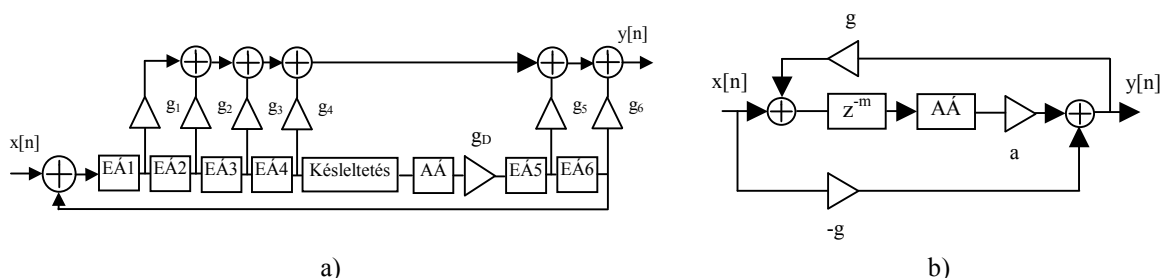


12. ábra

A módosított Schroeder típusú késői reverberátor egyetlen csatornájának frekvencia-jelleggörbéje

3.4. Az elnyelő mindent áteresztő reverberátor

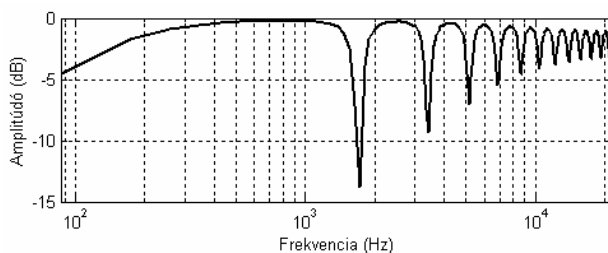
Az újabb reverberátor-tervezési módszer alapja a mindent áteresztő szűrők kaszkádkapcsolása (13.a ábra). A mindent áteresztő cellák egy elnyelő szűrőt (általában alul áteresztő) valamint egy késleltető egységet tartalmaznak [2]. Ezt a struktúrát nevezzük „elnyelő mindent áteresztő szűrőnek” és ezt mutatja be a 13.b ábra [2], [10], [11], [12], [13].



13. ábra

- a) Az elnyelő mindent áteresztő késői reverberátor blokkvázlata;
 b) Az elnyelő mindent áteresztő szűrő blokkvázlata

Egy elnyelő mindent áteresztő szűrő frekvencia-jelleggörbéje a 14-es ábrán látható.



14. ábra

Az elnyelő mindent áteresztő szűrő frekvencia-jelleggörbéje

Az elnyelő mindent áteresztő reverberátor, hat elnyelő mindent áteresztő szűrő láncolatából (EÁ1, ..., EÁ6) áll. Az elnyelő mindent áteresztő késleltető cella hosszúságát úgy választják meg, hogy prím legyen. A késleltető cellákat növekedési sorrendbe helyezik el.

A reverberáció csökkenésének idejét az a atenuátor és az alul áteresztő szűrő határozza meg. A késleltető cella az elnyelő mindent áteresztő szűrőben változtatja a módbeli sűrűséget (a rezonáns frekvenciákat). A visszhang sűrűségét a g erősítés határozza meg [2].

Az elnyelő mindent áteresztő szűrő struktúrája hasonló a Gardner típusú reverberátorhoz, de a nagy előnye az, hogy lehetővé tesz egy bizonyos kapcsolatot a reverberációs idő és a frekvencia között.

4. Tervezési és szimulációs eredmények

A tervezés során egy adott helyiség akusztikáját próbáljuk mesterséges módszerekkel megépíteni (utánozni). A bevezetőben említett helyiségről van szó, melynek jellemzőit az 1.a és az 1.b ábra mutatja be.

Amint az a 1.b ábráról leolvasható, a reverberációs idő kis frekvenciák esetében kb. 300 milliszekundum ($Tr(0)=300ms$) és a nagy frekvenciák esetében kb. 170 milliszekundum ($Tr(\pi)=170ms$). Nagy frekvenciának tekintettük a 10 KHz fölötti értékeket.

Egy teljes reverberátor egy korai és egy késői reverberációs algoritmus összetétele.

A reverberátorok működése a MATLAB/SIMULINK környezetben valós időben szimulálható.

Az utóbbi időben a Matlab féle Simulink a legelismertebb software csomag, amelyet az oktatásban és az iparban egyaránt használnak a rendszerek modellezésére és szimulációjára.

4.1. A helyiség akusztikájának modellezése és szimulációja a klasszikus Schroeder típusú reverberátor segítségével

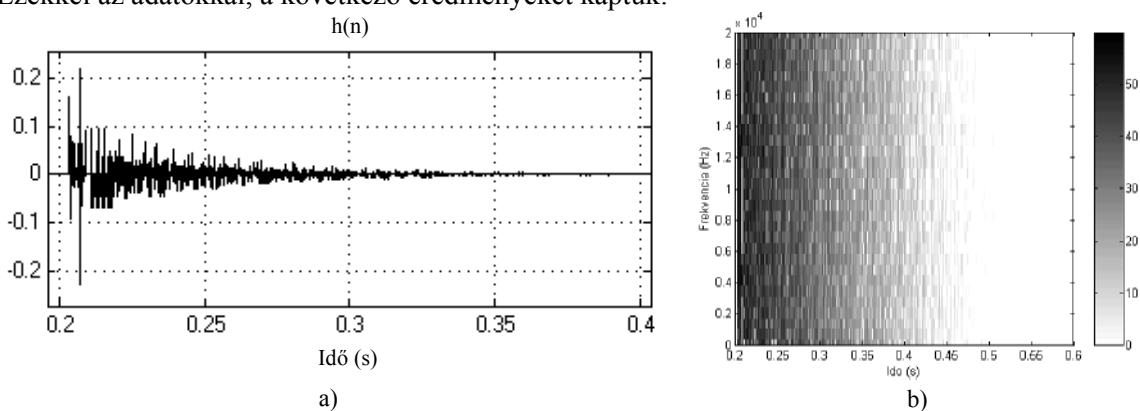
Amint azt már korábban említettem, a reverberációs idő és a frekvencia között nem lehet semmiféle kapcsolatot teremteni. A reverberátor tervezéséhez a (4) összefüggést használtam.

Az így kiszámított eredményeket az 1-es táblázatban foglaltam össze.

1. táblázat. A Schroeder reverberátor modelljének kiszámított adatai

Elem	Késleltetés (m_i) (ms)	Késleltetés (m_i) mintában	g_i
m_1	11.85	523	0.761
m_2	13.99	617	0.724
m_3	16.07	709	0.690
m_4	18.07	797	0.659
MASZ1	1.65	73	0.7
MASZ2	2.47	109	0.7

Ezekkel az adatokkal, a következő eredményeket kaptuk:



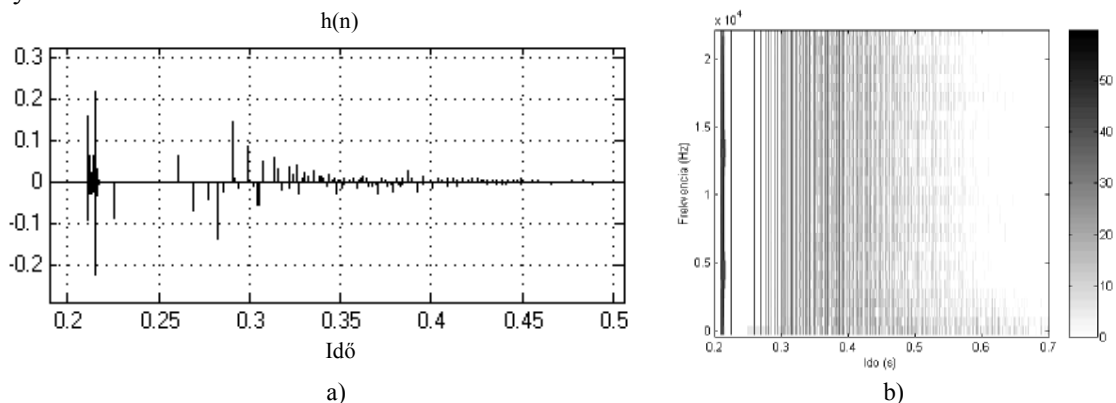
15. ábra

Egy teljes (korai + késői) Schroeder reverberátor: impulzusválasza; b) spektrogramja

Míg a Schroeder reverberátor impulzusválasza (15.a ábra) hasonló az eredeti helyiséghez (1.a ábra), a két spektrogram gyökeresen különbözik (1.b és a 15.b ábra). Megfigyelhető, hogy a Schroeder reverberátor esetében minden egyes frekvencia hasonlóképpen csökken, míg egy eredeti helyiségben előbb a nagy frekvenciák, majd a kicsik csökkennek.

4.2. A helyiség akusztikájának tervezése és szimulációja a Gardner típusú reverberátor segítségével

A Gardner típusú reverberátor teljesen empirikusan készült. Az alábbiakban a reverberátor szimulációs eredményei találhatók.



16. ábra

A Gardner reverberátor: a) impulzusválasza; b) spektrogramja

A Gardner impulzusválasza messze eltér egy eredeti helyiség impulzusválaszától (1.a és 16.a ábra). A spektrogramon némi javulás tapasztalható, a kis frekvenciájú impulzusok tovább tartanak mint a magas frekvenciájúak. Ez a javulás viszont csekély.

4.3. A helyiség akusztikájának tervezése és szimulációja a módosított Schroeder típusú struktúrával

A késleltetéseket Schroeder ajánlása szerint választottuk ki, a mód és a visszhang sűrűségének megfelelően [1]. A késleltetések prím értékeket tartalmaznak az üttetés megelőzése érdekében. A visszhang sűrűségét a csatornák számának a növelésével lehet gyarapítani (pl. párhuzamosan 8 csatornát használva). Az erősítést és az átviteli függvényt minden elnyelő szűrő esetében a (9)–(12) egyenletekből számoltuk ki.

Az így kiszámított eredményeket az 2-es táblázatban valamint a (13)–ban foglaltam össze.

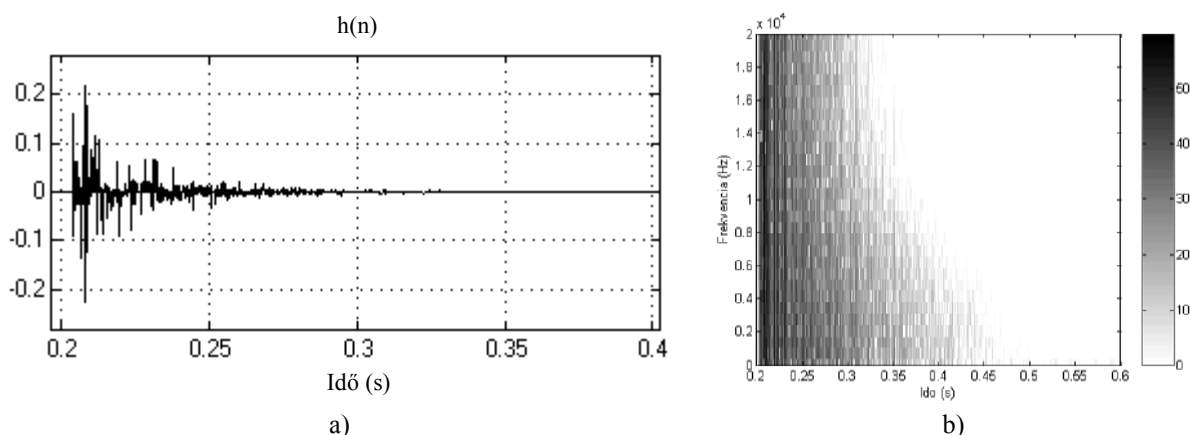
2. táblázat. A módosított Schroeder reverberátor modelljének kiszámított adatai

Elem	Késleltetés (m_i) (ms)	Késleltetés (m_i) mintában	g_i
m_1	11.85	523	0.761
m_2	13.99	617	0.724
m_3	16.07	709	0.690
m_4	18.07	797	0.659
MASZ1	0.83	37	0.7
MASZ2	0.92	41	0.7
MASZ3	1.06	47	0.7
MASZ4	1.2	53	0.7

Hogyha $Tr(0) = 300\text{ms}$, $Tr(\pi) = 170\text{ms}$, az elnyelő szűrők átviteli függvénye a következő:

$$\begin{aligned}
 h_1(z) &= \frac{0.6514}{1 - 0.1440z^{-1}}; \\
 h_2(z) &= \frac{0.6007}{1 - 0.1703z^{-1}}; \\
 h_3(z) &= \frac{0.5549}{1 - 0.1957z^{-1}}; \\
 h_4(z) &= \frac{0.5140}{1 - 0.2199z^{-1}}.
 \end{aligned} \tag{13}$$

A reverberátor impulzusválaszát a 17.a ábra, a spektrogramját pedig a 17.b ábra mutatja be.



17. ábra

A módosított Schroeder reverberátor: a) impulzusválasza; b) spektrogramja.

Mindkét ábráról megállapíthatjuk, hogy közel állnak az eredeti tömbház lakásban készített mérésekhez. Az előző algoritmusokhoz képest az eredmények kimagaslóan jobbak (biztatóak).

4.4. A tömbház lakás akusztikájának tervezése és szimulációja az elnyelő mindent áteresztő struktúrával

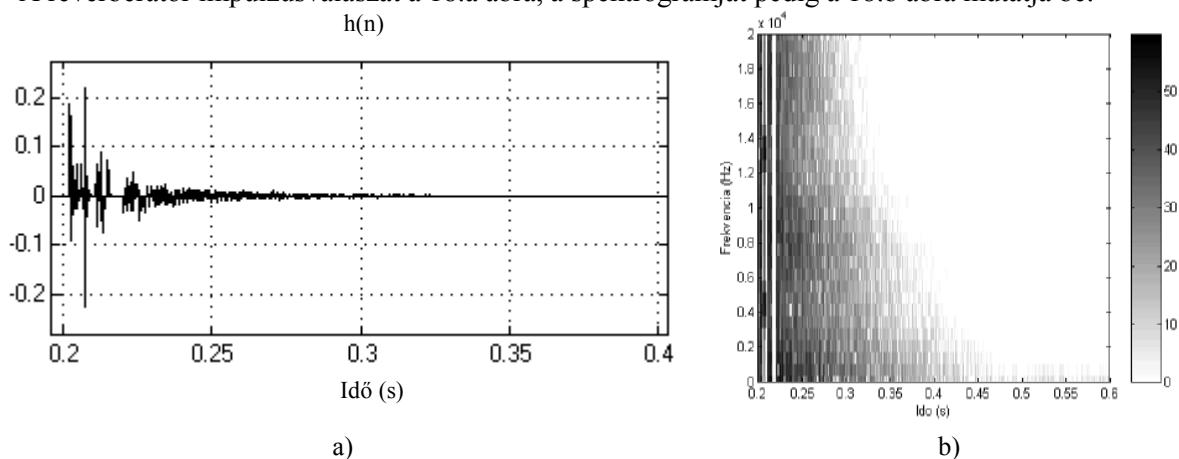
A tervezés ez esetben hasonló a módosított Schroeder típusú reverberátorhoz. A számítások eredményeit a 3-as táblázatban valamint a (14)-ben foglaltam össze.

3. táblázat. Az elnyelő mindent áteresztő reverberátor modelljének kiszámított adatai

Elem	Késleltetés (m_i) (ms)	Késleltetés (m_i) mintában	$g_i = a_i$
EÁ1	9.27	409	0.807
EÁ2	9.95	439	0.795
EÁ3	10.86	479	0.778
EÁ4	11.81	521	0.761
EÁ5	12.76	563	0.745
EÁ6	13.62	601	0.731

$$\begin{aligned}
 h_1(z) &= \frac{0.8866}{1 - 0.1133z^{-1}}; \\
 h_2(z) &= \frac{0.8787}{1 - 0.1212z^{-1}}; \\
 h_3(z) &= \frac{0.8673}{1 - 0.1326z^{-1}}; \\
 h_4(z) &= \frac{0.8556}{1 - 0.1443z^{-1}}; \\
 h_5(z) &= \frac{0.8444}{1 - 0.1555z^{-1}}; \\
 h_6(z) &= \frac{0.8344}{1 - 0.1655z^{-1}}.
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

A reverberátor impulzusválaszát a 18.a ábra, a spektrogramját pedig a 18.b ábra mutatja be.



18. ábra

Az elnyelő mindent áteresztő reverberátor: a) impulzusválasza; b) spektrogramja

Ez esetben is megállapíthatjuk, hogy az elért szimulációs eredmények hasonlóak az eredeti teremben mértetekhez.

5. Következtetések

A dolgozat az elektronikus rendszerekben használt mesterséges reverberáció technikáit mutatja be.

Ahhoz, hogy korai és késői visszaverődéseket nyerjünk, egy teljes reverberátor egy korai és egy késői kaszkádkapcsolatban álló reverberátorból kell álljon.

A reverberátorok alap összetevő elemei a következők: fésűs szűrők, mindent áteresztő szűrők, amelyek lehetnek kaszkádkapcsolásban vagy összeillesztett kapcsolatban egymással.

A korai Schroeder típusú reverberációs algoritmus egy sorozat, különböző távolságra helyezkedő impulzus csoportot hoz létre. Ezek mellett, a valós helyiségek impulzusválasza tartalmazza a korai visszaverődések között elhelyezkedett diffúz komponenseket is. Ezt a jelenséget a mindent áteresztő szűrő beiktatásával szimuláltuk.

A késői reverberáció fő karakterisztikája az exponenciálisan csökkenő nagy sűrűséggel rendelkező impulzus sorozat. A klasszikus késői reverberációs algoritmusok (Schroeder, Gardner) fésűs, mindent áteresztő és összekapcsolt mindent áteresztő szűrőkből állnak. Ezek hátrányai a következők: zavaró fémhangzás és a reverberációs idő és a frekvencia között nem lehet semmiféle kapcsolatot teremteni. A modern reverberációs algoritmusok (a módosított Schroeder és az elnyelő mindent áteresztő) megoldják a fent említett hátrányokat.

Egy térbeli hanghatást (pl. egy koncertterem esetében) egy korai és egy késői reverberátor kaszkádkapcsolásával nyerjük.

Könyvészet

- [1] M. Kahrs, K. Brandenburg, *Applications of Digital Signal Processing to audio and acoustics*. Kluwer Academic Publishers 1998.
- [2] L. Dahl, J. M. Jot, "A Reverberator Based on Absorbent All-pass Filter", Proceedings of COST G-6 Conference on Digital Audio Effects (DAFX-00), Verona, Italy, December 7-9, 2000, pp. 67-72.
- [3] Lauri Savioja, *Modelling Techniques for Virtual Acoustics*, Phd thesis, Helsinki University of Technology, 1999.
- [4] T. Lokki, J. Hiipakka, "A Time-Variant Reverberation Algorithm for Reverberation Enhancement Systems", Proceedings of COST G-6 Conference on Digital Audio Effects (DAFX-01), Limerick, Ireland, December 6-8, 2001, pp. 28-32
- [5] J. O. Smith III, *Physical Audio Signal Processing: Digital Waveguide Modeling of Musical Instruments and Audio Effects*, Center for Computer Research in Music and Acoustics (CCRMA), Department of Music, Stanford University, Stanford, California 94305 USA, August 2004, <http://www-ccrma.stanford.edu/~jos/waveguide/>.
- [6] N. Holzem, *Implementing reverberation algorithms in Matlab*, final work. Universidad de Zaragoza, Centro Politécnico Superior, Dpto. Ing. Electrónica y Comunicaciones, Université Libre de Bruxelles, Faculté des Sciences Appliquées, Service Electricité Générale, August, 1999
- [7] William Grant Gardner, *The Virtual Acoustic Room*, Master's Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1992.
- [8] M. Țopa, N. Toma, E. Szopos, "Design and Simulation of Reverberation Algorithms", Proceeding of the 6th COST 276 Workshop on Information and Knowledge Management for Integrated Media Communication, May 6-7, 2004, Thessaloniki, Greece, pp. 139-144
- [9] N. Toma, M. Țopa, E. Szopos, "Reverberation Algorithms", *Acta Tehnica Napocensis*, Volume 46, Number 2, 2005, pp. 27-34.
- [10] Norbert Toma, Marina Țopa, Erwin Szopos, "Obtaining Some Simple and Complex Sound Effects Using Digital Signal Processing Methods", The 36-th International Symposium Military Equipment and Technologies Research Agency, May 26-27, 2005, Bucharest, Romania, pp. 324-329
- [11] Norbert Toma, Marina Țopa, Erwin Szopos, "On Improved Reverberation Algorithms", The 47th International Symposium ELMAR-2005 focused on Multimedia Systems and Applications (IEEE), 08-10 June, 2005, Zadar, Croatia, pp. 217-220
- [12] Norbert Toma, Marina Țopa, Erwin Szopos, "Aspects of Reverberation Algorithms", 7- th International Symposium on Signals, Circuits and Systems-ISSCS 2005 (IEEE), July 14-15, 2005, Iasi, Romania, pp. 577-580
- [13] Norbert TOMA, Marina ȚOPA, Victor POPESCU, Erwin SZOPOS, "Comparative Performance Analysis of Artificial Reverberation Algorithms", 2006 IEEE-TTTC International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics-AQTR 2006, May 25-28, 2006, Cluj Napoca, Romania, pp. 138-142.
- [14] Marina Dana ȚOPA, Norbert TOMA, Erwin SZOPOS, "Performance Analysis of Some Artificial Reverberators", The 6-th IEEE Communications International Conference – Comm 2006, June 8-10, 2006, Bucharest, Romania, pp.73-76