Visszacsatolásos akusztikai modell

1. Előzmények

A teremakusztikai modellekben a terem forrástól és vevőtől független analízisére nincs általánosan alkalmazható eljárás. A létező modellek durva egyszerűsítései a valóságnak, illetve speciális helyzetekben tekinthetők csak érvényesnek.

A teremakusztikai modellezés jól kidolgozott területe a sugárkövetéses eljárás, illetve ennek különböző változatai. Ezek közül a nyalábkövetéses eljárás számít elméleti és programozhatóság szempontjából jó kompromisszumnak. Ezek a modellek azonban mind energetikai alapon működnek, frekvenciatartományban korlátozottan érvényesek és nem adnak megoldást a nem-geometriai jelenségekre.

Az alábbi gondolatmenet egy egyszerűnek tűnő megközelítést mutat be, ami általánosan, akár nem csak teremakusztikai modellek számításánál is használató. Az ötlet újdonsága miatt a kísérleti bizonyítás és a kódolás még nem történt meg, így a leírás egyelőre csak elméletinek tekinthető.

2. Nem-geometriai jelenségek kezelése teremakusztikai modellekben

A teremakusztikai modellekben nem-geometriai jelenségnek számít minden olyan energiaközlés, ami a geometriai visszaverődés modelljével nem leírható. A továbbiakban az egyszerűség kedvéért az alábbi feltételezésekkel élünk:

- a hullámterjedési közeg lineáris, homogén és időinvariáns,
- a hullámterjedési közeg és a határoló (visszaverő) felületek nem hatnak egymásra (a határoló felületek tökéletesen merevek),
- a határoló felületek egyenesekkel határolt síkokkal írhatók le,
- a hangforrás pontszerű.

A feltételek alapján a továbbiakban kezelendő nem-geometriai jelenségek:

- nem-geometriai visszaverődés vagy szóródás („scattering”),
- elhajlás az akadályok mentén (diffrakció).

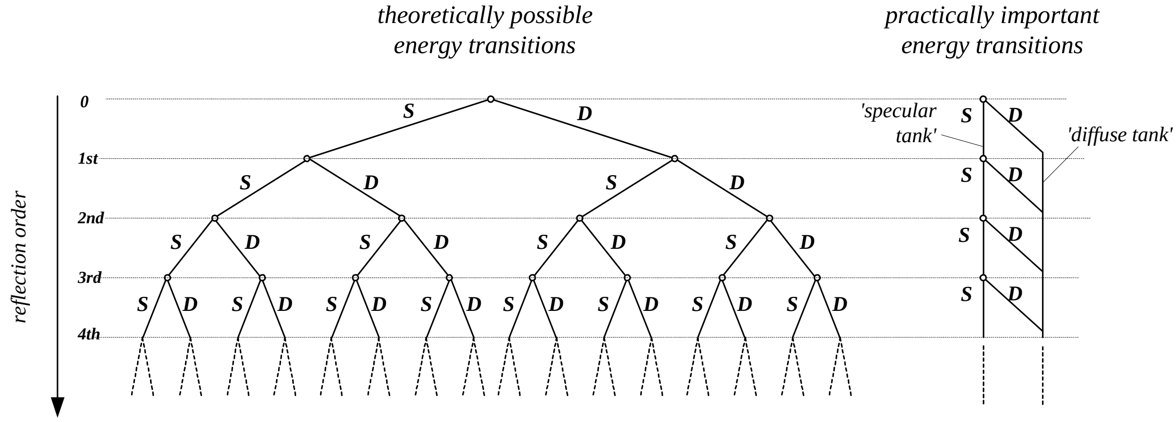
Mindkét jelenség arra vezethető vissza, hogy a felületekre beérkező hangenergia visszaverődő hányadának egy része a véges kiterjedésű sík felületről nem csak a geometriai irányba, hanem minden más irányba is terjed.

A nem-geometriai irányú visszaverődéseket másodlagos hangforrásként kezelik a különböző modellek, félgömb illetve nyolcas (koszinuszos) iránykarakterisztikával. Előbbi az általános diffúz téri modell, az utóbbi Lambert-féle diffúz modell pedig a sugárzó felületelemek elvével magyarázható.

A makroszkópikus közelítő elvek szerint a beeső és visszaverődő energiák lehetséges kombinációi (Dalenback et al.):

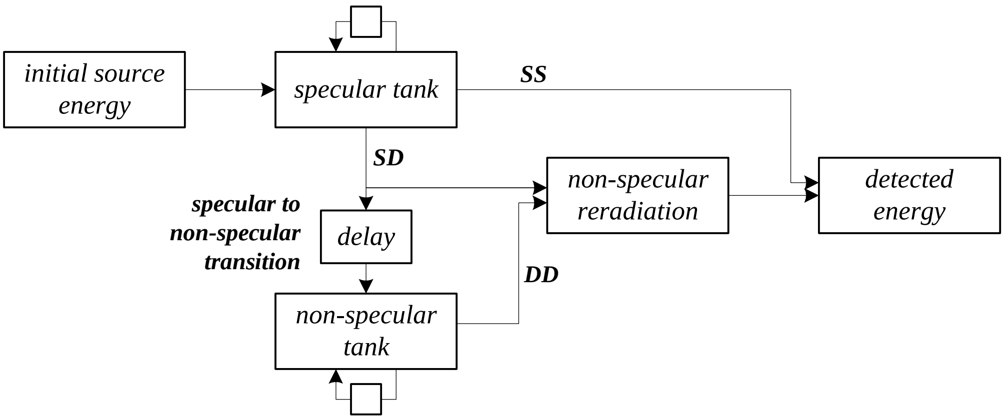
- geometriai beesés, geometriai visszaverődés (SS – specular to specular),
- geometriai beesés, diffúz visszaverődés (SD – specular to non-specular),
- diffúz beesés, geometriai visszaverődés (DS – diffuse to specular),

- diffúz beesés, diffúz visszaverődés (DD – diffuse to diffuse).



1. ábra: A különböző visszaverődési kombinációk egyszerűsítése

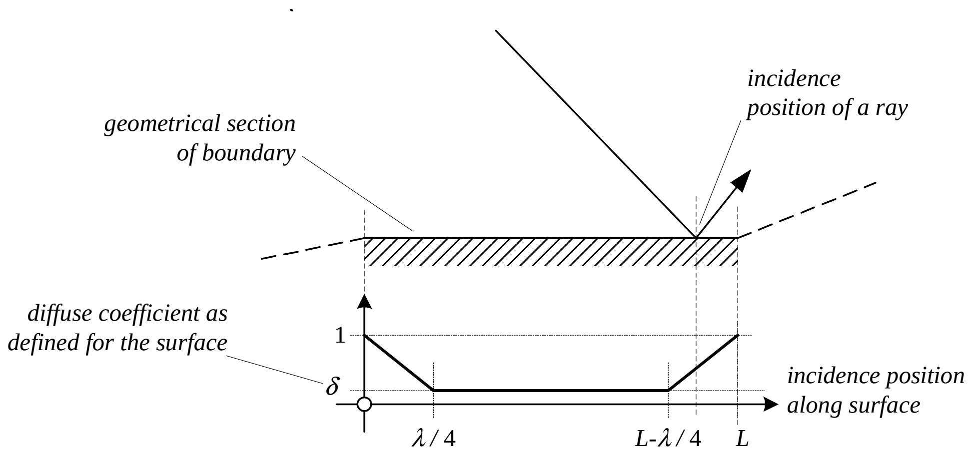
Az összes lehetséges visszaverődési kombinációt lehetetlen lekövetni, ugyanakkor belátható, hogy a diffúzzá vált visszaverődő energiát már nem lehet geometriainak tekinteni, ezért csak az SS, SD és DD kombinációkkal érdemes számolni.



2. ábra: Az egyszerűsített diffúz visszaverődési modell és a diffúz tank bevezetése.

Ezen felül, a diffúz téri elmélet szerint a diffúz energia a hangtér egészét kitölti (legalábbis a visszaverő felületektől elegendő távolságban), tehát a diffúzá vált energia egyenletesen oszlik el a hangtérben, illetve egyenletesen verődik vissza a felületekről. Ez a megközelítés csak erősen csatolt, egybefüggő terek modellezése esetén helytálló, de egyébként hatékony és jól használható.

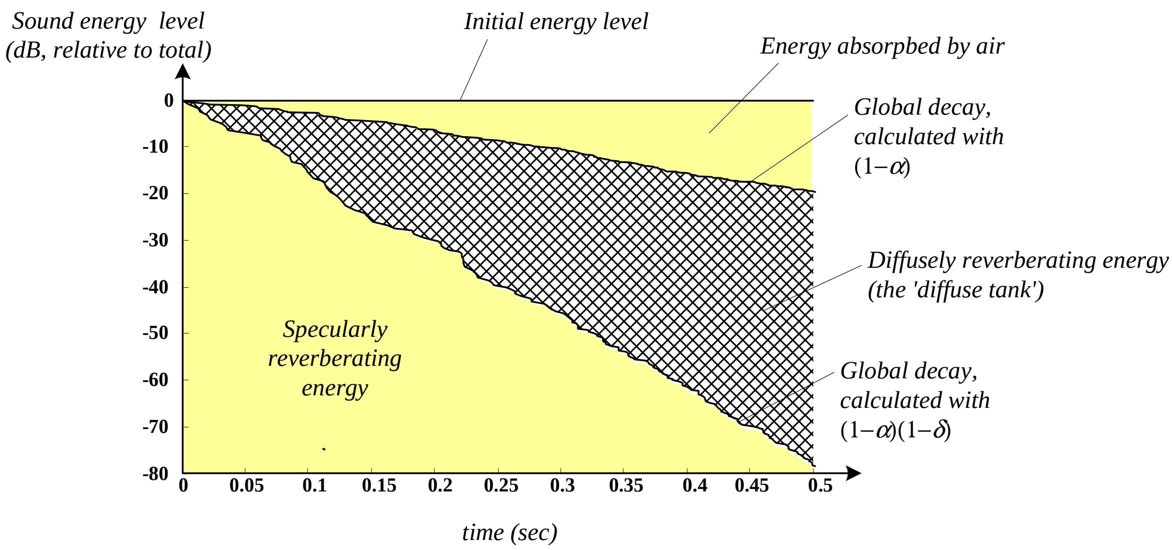
Egyéb implementációkban független, véletlenszerűen visszaverődő sugárkövetéssel és a diffúz visszaverődési tényező éltávolság szerinti változtatásával közelítenek.



3. ábra: A diffrakció közelítése diffuzitási tényezővel.

3. Visszacsatolásos modell

Az egyenletesen elosztott diffúztéri energiákkal működő modell analóg a mesterséges zengetők „diffúz tank” modelljével: a diffúz hangenergia egy önmagába visszacsatolt, a nem diffúz (azaz geometriai) folyamatokkal párhuzamosan működő rendszert képez. A diffúz visszaverődési tényezőn keresztül pedig a térben megmaradó energia fokozatosan alakul át geometriaiból diffúzzá.



4. ábra: A diffúz tank hatása, a geometriai energia átalakulása diffúz energiává.

3.1. Elvárások a modellel szemben

Olyan teremakusztikai (vagy általában akusztikai) modellre van szükség, ami lehetőséget ad a csak a teremre kiterjedő analízisre és nem zárja ki az általánosítás (frekvencia-tartománybeli vagy időtartomány-beli modell) lehetőségét sem, egyúttal konvergál a már ismert modellek végeredményeihez is.

3.2. Alapfeltevések

Tegyük fel, hogy a hangtér határoló felülete N-számú, kellően kis méretű felületre van osztva. Minden felület egyenrangú vagy a felület nagyságával súlyozottan vesz részt a hangtér alakításában. A modell feladata, hogy az összes lehetséges hangterjedési utat feltárja és az ezek összegéből adódó hangteret analitikusan kezelje.

A hangtérbe helyezett forrásból az *i*-dik felület(elem) $\mathbf{G}(\mathbf{r}_S,\mathbf{r}_i) = \mathbf{G}_{S,i}$ függvénnyel látszódik. A felület elemei egymást a $\mathbf{G}(\mathbf{r}_i,\mathbf{r}_j) = \mathbf{G}_{i,j}$ függvénnyel, a vevőpontot pedig a $\mathbf{G}(\mathbf{r}_R,\mathbf{r}_i) = \mathbf{G}_{R,i}$ függvénnyel látják. A felületre beeső és onnan visszaverődő hang viszonyát hasonlóan az $\mathbf{R}_{S,i}$, $\mathbf{R}_{i,j}$ és $\mathbf{R}_{R,i}$ függvényekkel írjuk le. A forrást az i-edik felületelm irányában az $\mathbf{s}_i$ függvény jellemzi. Minden két pont közötti függvény reciprok (tehát pl. $\mathbf{G}_{i,j} = \mathbf{G}_{j,i}$).

3.3. A visszacsatolásos modell bevezetése

A hangteret a továbbiakban a hangterjedés lehetséges kombinációival írjuk le, a fenti jelölések felhasználásával.

Első lépésben a hang a forrástól a felületekig terjed. A felületek mentén az *i*-edik elemről a hangtérbe jutó et az $a_{i,1}$ mennyiség írja le:

$$a_{i,1} = \mathbf{s}_i \cdot \mathbf{G}_{S,i}$$

A következő lépésben az *i*-edik felületelemre a *j*-edik ($j \neq i$) felületelemekről visszaverődő hangok összege jut, amit az $\mathbf{R}_{S,i}$ és a $\mathbf{G}_{i,j}$ függvényekkel lehet kifejezni. A többszörös összegződés elkerülése érdekében $\mathbf{G}_{i,i} = 0$.

$$a_{i,2} = \sum_{j=1}^{N} a_{j,1} \cdot \mathbf{R}_{S,j} \cdot \mathbf{G}_{i,j}$$

A következő lépésben hasonló gondolatmenettel:

$$a_{i,3} = \sum_{j=1}^{N} a_{j,2} \cdot \mathbf{R}_{i,j} \cdot \mathbf{G}_{i,j}$$

A k-adik lépésben:

$$a_{i,k} = \sum_{j=1}^{N} a_{j,k-1} \cdot \mathbf{R}_{i,j} \cdot \mathbf{G}_{i,j}$$

Egyszerűsítve:

$$\mathbf{a}_1 = \mathbf{s} \cdot \mathbf{G}_S$$
$$\mathbf{a}_2 = \mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{R}_S \cdot \mathbf{G}$$
$$\mathbf{a}_k = \mathbf{a}_{k-1} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{G}$$

Felismerhető, hogy ez egy geometriai sort alkot, ahol a hányados $\mathbf{Q} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{G}$., azaz $\mathbf{a}_k = \mathbf{a}_{k-1} \cdot \mathbf{Q}$.

A vevőpontban az összes felületelemről a hangtérbe jutó hangot az $\mathbf{R}_{R,i}$ és a $\mathbf{G}_{R,j}$ függvényekkel lehet kifejezni, ahol a visszaverődésektől függetlenül a direkt hang is szerephez jut:

$$\mathbf{r}_0 = \mathbf{s}_R \cdot \mathbf{G}_{S,R}$$

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{R}_R \cdot \mathbf{G}_R$$

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{a}_k \cdot \mathbf{R}_R \cdot \mathbf{G}_R$$

A hangteret a vevőpontban az összes lépés összege adja:

$$\sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{r}_k = \mathbf{r}_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \mathbf{r}_k = \mathbf{r}_0 + \mathbf{R}_R \cdot \mathbf{G}_R (\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2 + \mathbf{a}_3 + \mathbf{a}_4 \ldots)$$

Azaz

$$\sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{r}_k = \mathbf{r}_0 + \mathbf{R}_R \cdot \mathbf{G}_R \left[\mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{R}_S \cdot \mathbf{G}\left(1 + \mathbf{Q} + \mathbf{Q}^2 + \ldots\right)\right] = \mathbf{r}_0 + \mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{R}_R \cdot \mathbf{G}_R \left[1 + \mathbf{R}_S \cdot \mathbf{G} \frac{1}{1 - \mathbf{Q}}\right]$$

ha igaz az, hogy $|\mathbf{Q}| < 1$.

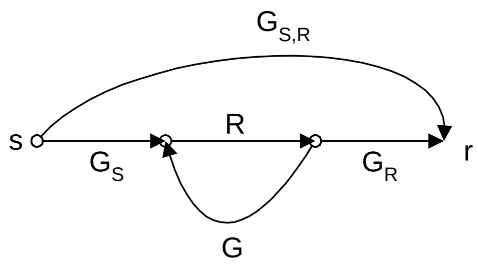
Illetve

$$\sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{r}_k = \mathbf{s}_R \cdot \mathbf{G}_{S,R} + \mathbf{s} \cdot \mathbf{G}_S \cdot \mathbf{R}_R \cdot \mathbf{G}_R \left[1 + \mathbf{R}_S \cdot \mathbf{G} \frac{1}{1 - \mathbf{R} \cdot \mathbf{G}}\right].$$

3.4. A visszacsatolásos modell értelmezése

A végeredmény alapján látható, hogy a kifejezés egyes tagjai külön írják le:

- a forrás és a vevő közötti közvetlen viszonyt,
- a forrás és a terem közötti viszonyt
- a terem saját viselkedését
- a terem és a vevő közötti viszonyt.



5. ábra: A hang terjedésének útjai, általános függvényekkel leírva.

Az eddigiekben az egyes viszonyokat általában csak „függvényként” írtuk le, azonban elvileg tetszőleges megközelítés alkalmazható.

Például a statisztikus teremakusztikában a hangtér intenzitására visszakapjuk az ismert képletet, ha

$$G, G_R = 1$$
$$R, R_R, R_S = (1 - \alpha)$$
$$G_S = \frac{4}{S}$$
$$G_{S,R} = \frac{1}{4 \cdot r^2 \cdot \pi}$$

4. Összefoglalás

A bemutatott képlet zárt és általános formában adja meg a hangtér leírását. Az alábbi lehetőségeket kell megvizsgálni, ha a leírásban az *i*-edik és *j*-edik pontok távolságát komplex átviteli függvényben figyelembe vesszük:

- ha az átviteli függvényekben Laplace-transzformálttal számolunk, a kapott átviteli függvény zárt alakban bármely teremre érvényes lehet tranziens és stacioner állapotában. A nevező zérusai adják a terem módusait.
- ha az átviteli függvényekben Fourier-transzformálttal számolunk, a kapott átviteli függvény zárt alakban bármely teremre érvényes lehet stacioner állapotában. A nevező zérusai adják a terem módusait.

Az R vektor csak a terem felületére, a G mátrix csak a terem geometriájára jellemző. Egy tervezés során ezért a felület és a geometria hatása külön és analitikusan vizsgálható.

Érdemes megvizsgálni, hogy mivel sehol sincs kikötve a hangtér zártsága, hogy félig nyitott vagy nyitott terekben hogyan lehet (ha lehet) alkalmazni a modellt.

Budapest, 2006. június 6.