

Geometriai akusztikai módszerek a számítógépes teremakusztikai tervezésben

Fürjes Andor Tamás

BME Híradástechnikai Tanszék Rezgésakusztikai Laboratórium

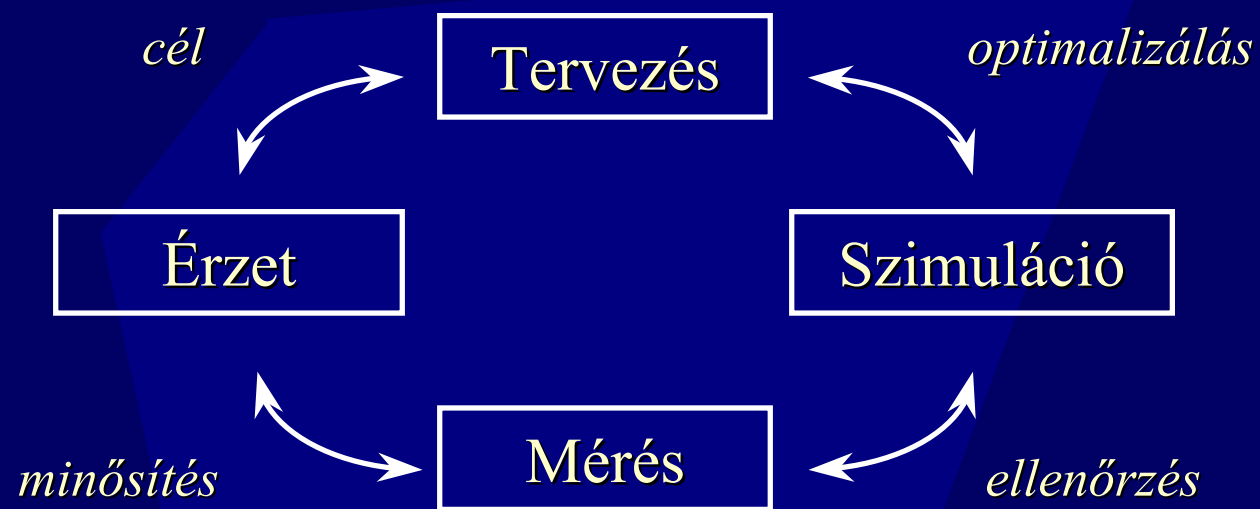



Tartalom

- Bevezető
- Statisztikus akusztika
- Geometriai akusztika
- RAYNOISE


Bevezető

- A teremakusztikai tényezők köre...





Bevezető - a kérdések

- Érzeti oldal: mik és hogyan befolyásolják a teremérzetet?
 - Mérési oldal: hogyan írják le a mérhető paraméterek az érzetet?
 - Tervezési oldal: hogyan lehet tervezni a mérhető paraméterekre?
- 

Bevezető - az érzeti oldal

Hangtisztaság
... Határozottság
Térmozgás Térérzet
Hangzás
Hangszínezettség
Áttetszőség

Terem alak és méret

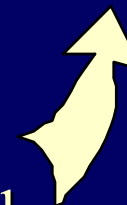
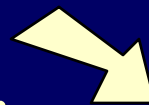
Felületek jellemzői

Forrás és vevő típusa,
pozíciója és jellemzői

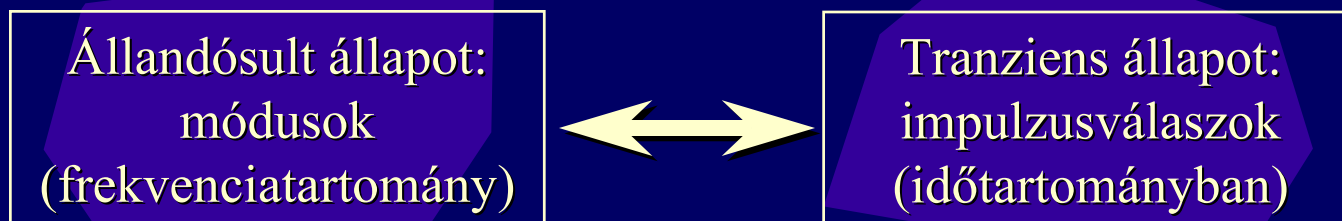
Közvetlen hang

Első visszaverődések

Zengés



Bevezető - mérések

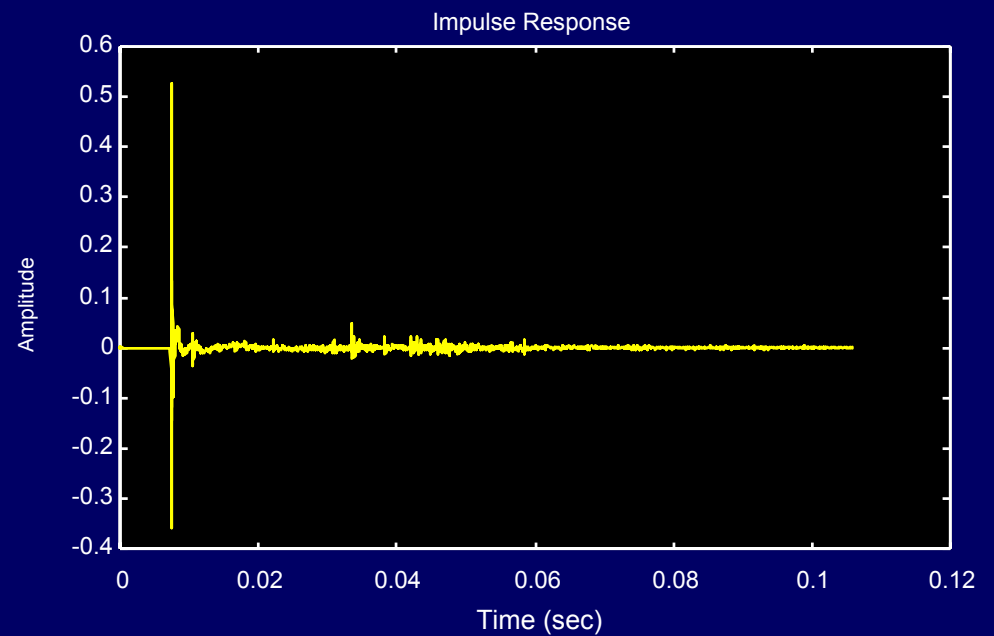


Lineáris, időinvariáns rendszer a terem

- Egyszerűbb az impulzusválasz mérése, jellemzése
- Legelterjedtebb az MLS mérés technika (pl. MLSSA)

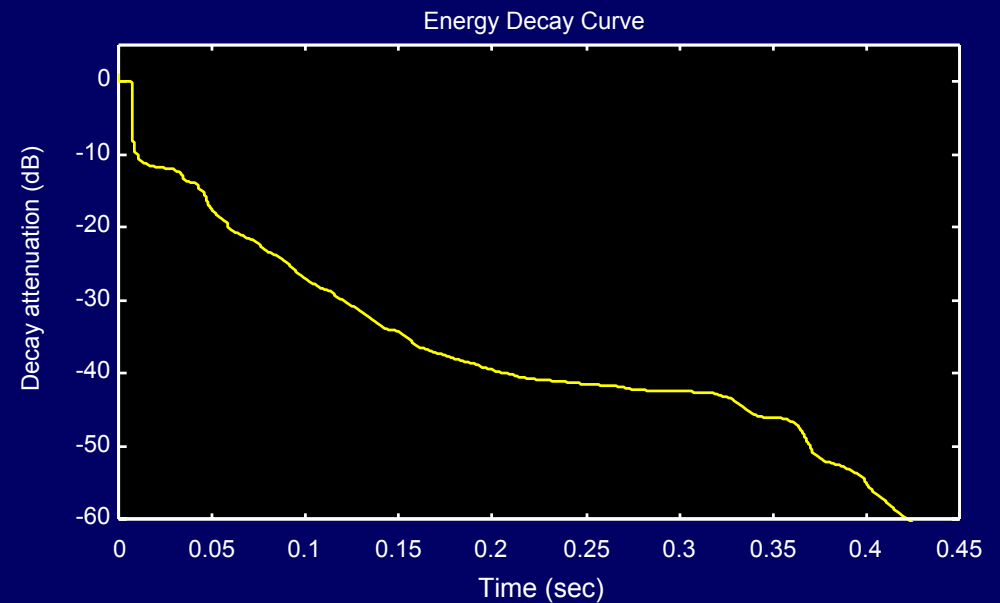
Bevezető - az impulzusválasz

- Direkt hang
- Első visszaverődések
- Zengés



Bevezető - a lecsengési görbe

$$EDC(t) = 10 \cdot \log_{10} \left[1 - \frac{\int_0^t p^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} p^2(\tau) d\tau} \right]$$



- Az impulzusválasz energiatartalmának időbeli eloszlása
- Elkülöníthető szakaszok

Bevezető - “egycsatornás” paraméterek I.

Egy pont pontos helyét határozzák meg az EDC-n...

- Szint alapján időt mér:

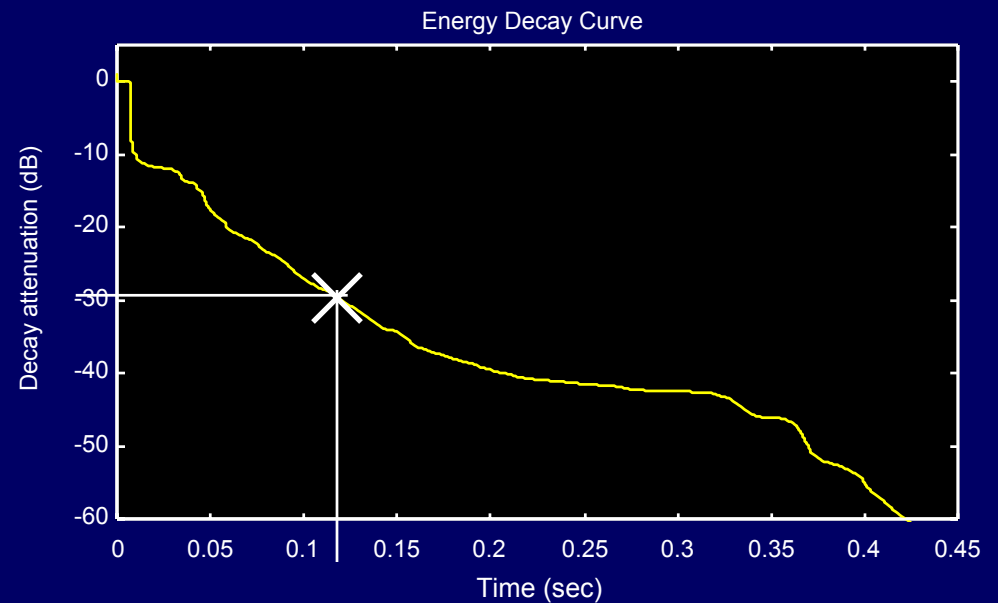
$$EDC(t_0 + ?) = A$$

pl. RT_{60}

- Idő alapján szintet mér

$$EDC(t_0 + t_e) = ?$$

pl. $C(t_e)$, $D(t_e)$ (speciális, irányral súlyozott: $LEF(t_e)$, stb.)



Bevezető - “egycsatornás” paraméterek II.

Két pont relatív pozícióját határozzák meg az EDC-n...

- Szinteltérés alapján időeltérés:

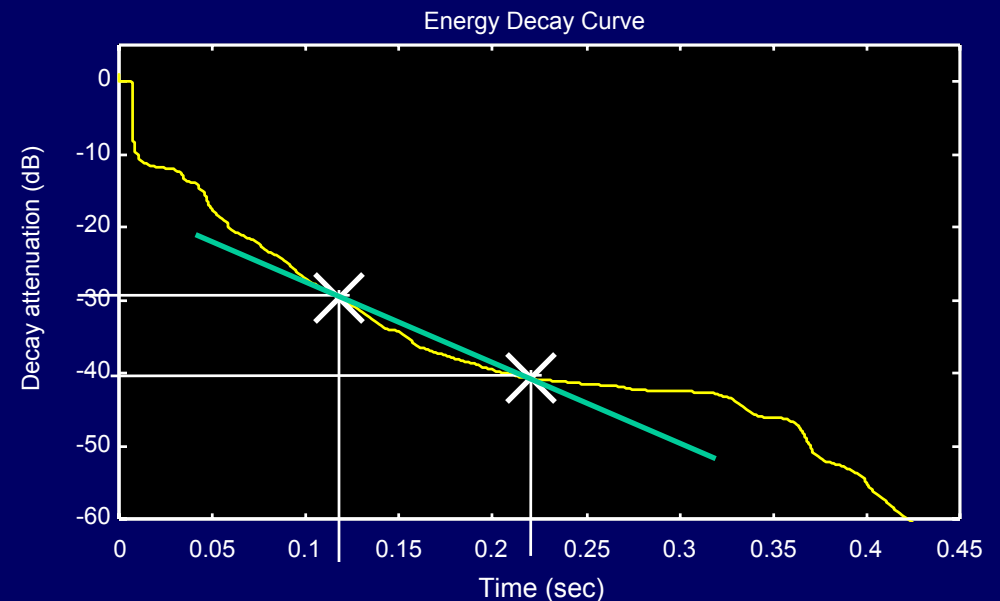
$$EDC(\Delta t ?) = \Delta A$$

pl. RT_{5-25} , RT_{5-35} , stb.

- Időeltérés alapján szinteltérés:

$$EDC(\Delta t) = \Delta A ?$$

pl. $M=C(20\text{ms})-C(5\text{ms})$



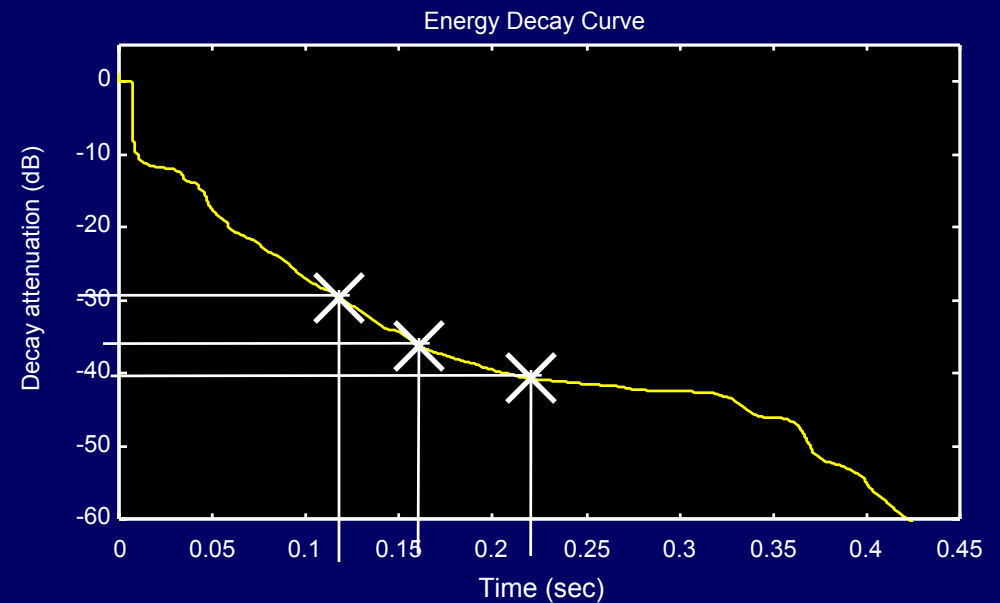
Bevezető - “egycsatornás” paraméterek III.

Három pont relatív helyzetét határozzák meg az EDC-n...

(early-late averaging)

- Stabilabb eredmény

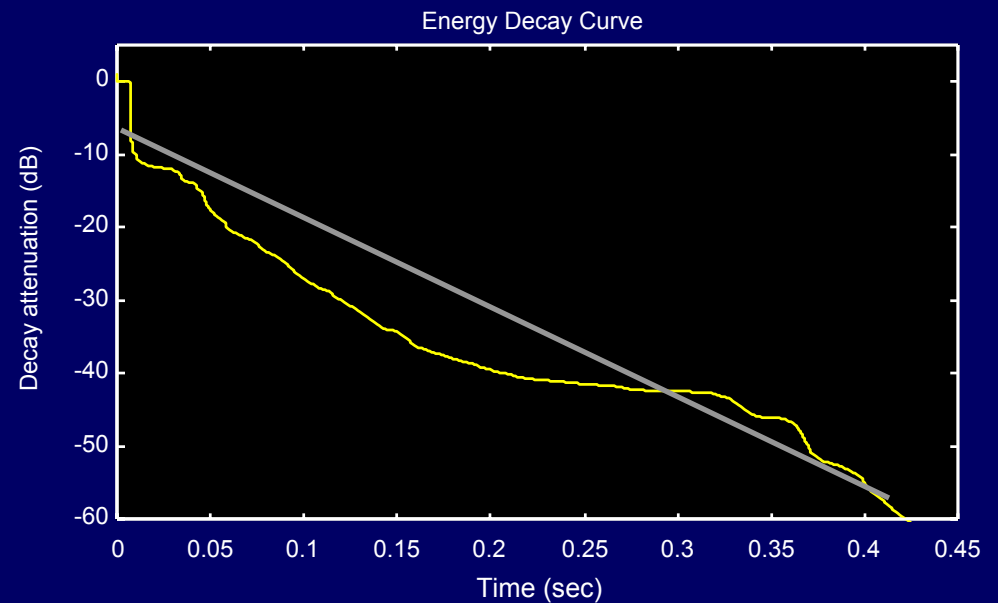
$$\frac{EDC(t_1 - \Delta t) + EDC(t_1) + EDC(t_1 + \Delta t)}{3} = ?$$



Bevezető - “egycsatornás” paraméterek IV.

Az EDC görbületét jellemzi...
pl. “Centre time”

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$



Bevezető - “többcsatornás” paraméterek

- Energiaeloszlás térbeli ingadozása - térhatás “envelopment” jellemzése, pl:

IACC (2 csatorna, HRTF, korreláció), vagy

DFT (integrálás, HRTF, korreláció, stb.)...

- további paraméterek?...

Frekvenciafüggés!!

Bevezető - analitikus megoldások

Hullámegyenlet megoldásai...

- tér felosztása - FEM
- felületek felosztása - BEM
- időtartomány diszkretizálása - FDM

Kombinált: TIBEM, WRW, Radiosity, stb.

Jellemzők

- tetszőleges pontosság,
- hálógenerálás, peremfeltételek beállítása nehézkes,
- nagy számításigény,
- speciális helyzetek (csatolás), kisfrekvenciás viselkedés esetén...

Bevezető - statisztikus megoldások

Módussűrűség nagy - statisztikus megközelítés megfelelő

- analitikus megközelítés nem kivitelezhető (számításigény)
- Schroeder határfrekvencia

$$(\Delta f)_{\text{res}} > 3 \cdot (\Delta f)_{\text{mode}} \Rightarrow f_{\text{sch}} = \sqrt{\frac{c^3}{4 \cdot \ln 10}} \sqrt{\frac{T_{60}}{V}}$$

Módszerek

- csatolt elemek közötti energiaáramlás - SEA
- egyenletes energiaeloszlás (“diffúz tér”) - statisztikus teremakusztika



Bevezető - nagyfrekvenciás közelítések

Hullámfront haladása

- “hansugarak” - ray
- “hangrészecskék” - particle
- “hangnyalábok” - beam

Jellemzők

- a leírt hullámfront sokkal nagyobb mint a hullámhossz
- nagyfrekvenciás közelítés (ld. pl. Schroeder-frekvencia)
- hatékony, könnyen kezelhető...

Bevezető - számítógépes modellek

Modellek általános felépítése



- geometria
- forrás
- vevő
- peremfeltételek (felületek)

- mérhető paraméterek
- átviteli függvények

Statisztikus teremakusztika

Alapfeltevések

- diffúz hangtér

“Az irány szerinti energiasűrűség irányfüggetlen...”

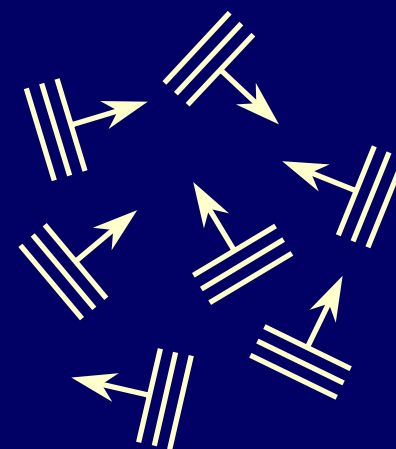
$$D(\mathbf{e}) = \lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \frac{\overline{w_{\Delta\Omega}}}{\Delta\Omega}$$

- egyenletes energiaeoszlás

“Az akusztikus energia pontbeli átlaga helyfüggetlen...”

“... kb. a 100. visszaverődéstől számolhatunk ezzel...”

$$t > \frac{3l}{c}$$



Statisztikus teremakusztika II.

Sabine-Franklin-Jaeger

- exponenciális lecsengés, -60dB lecsengéshez tartozó idő: RT_{60}

$$\overline{w}(t) = \overline{w}_{\text{init}} \cdot e^{-t/\tau} \Rightarrow RT_{60} = \frac{(24 \cdot \ln 10) \cdot V}{c \cdot \sum_i \alpha_i A_i}$$

- véletlen beeséshez tartozó elnyelési tényező:

$$\alpha_{\text{ri}} = \frac{1}{\pi} \iint \alpha(\mathbf{e}) \mathbf{e} \cdot \mathbf{n}_{\text{out}} d\Omega = 2 \int_0^{\pi/2} \alpha(\Theta) \cdot \cos \Theta \cdot \sin \Theta d\Theta$$

Statisztikus teremakusztika III.

Közepes szabad úthossz

- az azonos irányba haladó akusztikus energia - “sugarak”
- karakterisztikus úthossz:

$$l_c = \frac{4V}{S}$$

“... a két visszaverődés között megtett átlagos úthossz...”

Norris-Eyring

$$\bar{w}(t) = \bar{w}_{init} (1 - \bar{\alpha})^{ct/l_c} = \bar{w}_{init} e^{-t/\tau_{NE}} \Rightarrow \tau_{NE} = \frac{4V}{cS[-\ln(1 - \bar{\alpha})]}$$

Statisztikus teremakusztika IV.

Teremállandó

“... a zengő energia állandósult állapotban...”

$$w_R = \frac{4 \cdot P}{c \cdot R_{rc}}, \quad R_{rc} = \frac{\bar{\alpha} \cdot S}{1 - \bar{\alpha}}$$

Kritikus sugár, zengő sugár

“... amikor a zengő és a direkt hang egyenlő...”

$$r_0 = \left(\frac{R_{rc} \cdot Q_{\Theta}}{16\pi} \right)$$

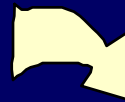
Statisztikus teremakusztika V.

Korlátok

- csak globális jellemzők
- az alapfeltevések ritkán közelítik a valóságot

Amire szükség lenne...

- helyfüggő jellemzők
- részletesebb tranziens jellemzők

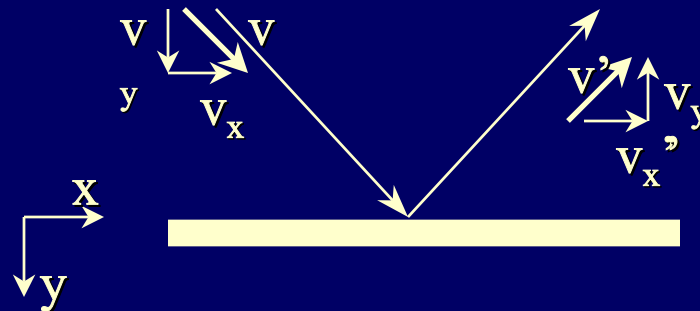


geometriai modellek

Geometriai modellek - bevezető

Alapfeltevések

- a hangenergia egyenes irányban halad a homogén, nyugvó közegben
- a hangenergia optikai módon (“specular”) verődik vissza



- hullámjelenségek (“non-specular”) nincsenek

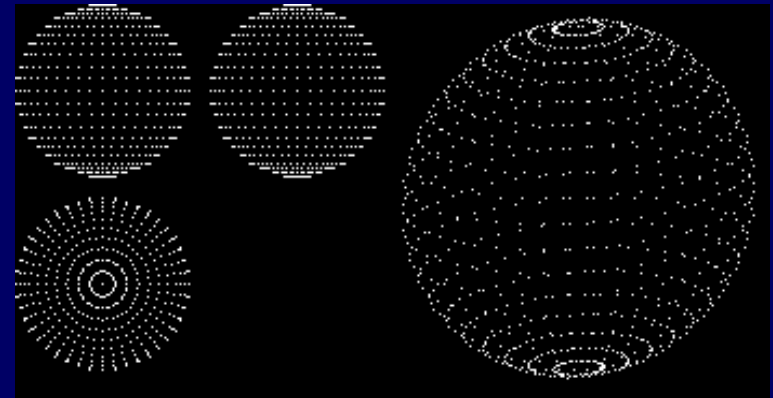
Geometriai modellek - forrás leírása

Forrástípusok

- ideális pontforrás
- ideális vonalforrás
- felületi forrás

Leíró paraméterek

- frekvenciafüggő hangnyomás (SPL)
- frekvenciafüggő iránykarakterisztika
- pozíció
- helyzet (irány, elforgatás)



Geometriai modellek - terjedés leírása

Terjedési sebesség

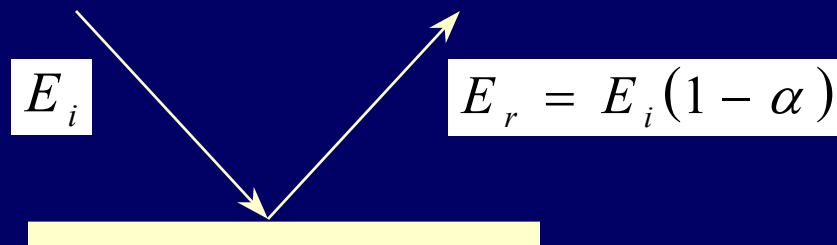
$$c = 331,4 \cdot \sqrt{1 + \frac{\vartheta}{273}} [m / s]$$

Terjedési csillapítás - forrástípustól, modelltől függ...

Levegő csillapítása

$$m_b = \frac{f^2 [1 - 0,04 \cdot (\vartheta - 20)]}{\Phi} \cdot 17 \cdot 10^{-9} [1 / m]$$

Visszaverődés



Geometriai modellek - vevő leírása

Vevőtípusok

- pontszerű vevő
- felületi vevő

Leíró paraméterek

- frekvenciafüggő érzékenység
- frekvenciafüggő iránykarakterisztika
- pozíció
- helyzet (irány, elforgatás)

A fázis figyelembe vétele

- inkoherens - detektálások összeadódnak
- koherens - detektálások megtett út szerint fázis alapján adódnak össze

Geometriai modellek - algoritmusok I.

Sugárkövetés - Ray Tracing Method

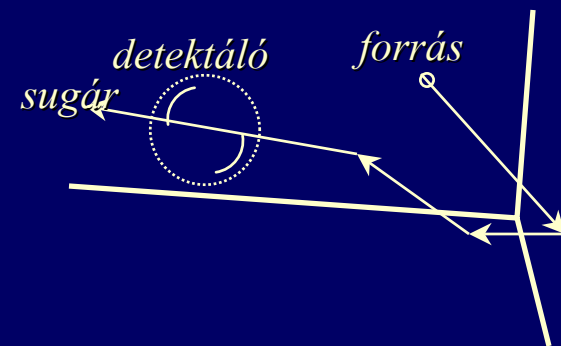
- a hullámfelületet sugarak (pontok, részecskék, stb.) képviselik
- detektáló felületre van szükség
- az eredmény ezért hisztogram

Előnyök

- igen egyszerű, jól kezelhető modell

Hátrányok

- rossz időbeli felbontás (hisztogram)
- erősen statisztikus jelleg...



Geometriai modellek - algoritmusok II.

Tükörforrások módszere - Mirror Image Source Method

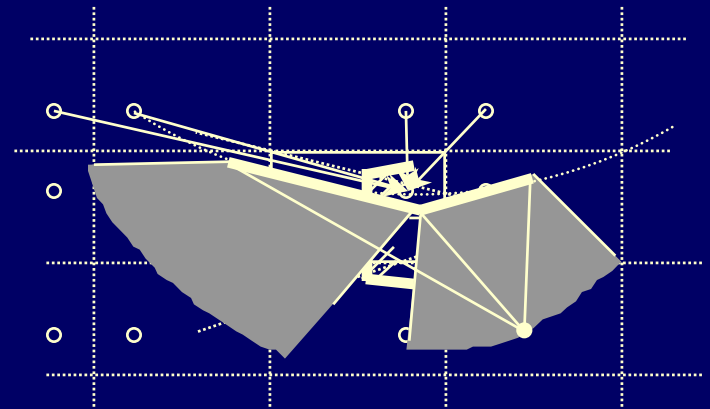
- a visszaverő felületek “tükrözik” a forrást (sík felületek)
- tükörforrás tükörforrása - magasabb rendű visszaverődések
- detektáló pont

Előnyök

- téglatest szobára analitikus megoldás
- pontos időzítések és irányok

Hátrányok

- tükörforrások száma exponenciálisan nő - számítási igény
- láthatósági tesztek, csak sík felületek...



Geometriai modellek - algoritmusok III.

Kúpkövetéses módszer - Cone Tracing Method

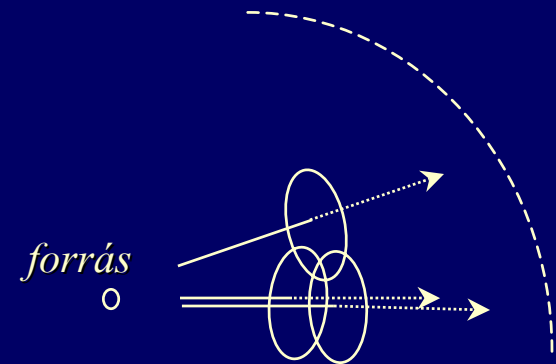
- a gömbalakú hullámfrontot gömbsüvegek írják le
- a hullámfelület-darabok útját a középvonal határozza meg
- detektáló pont

Előnyök

- pontos időzítés és irány
- az RTM és MISM ötvözete
- egyszerű megvalósítás, kis számítási igény

Hátrányok

- a kúpok átlapolódnak, súlyozó függvényre van szükség
- térbeli felbontás romlása - “egyfajta statisztikusság...”



Geometriai modellek - algoritmusok IV.

Nyalábkövetéses módszer - Beam Tracing Method

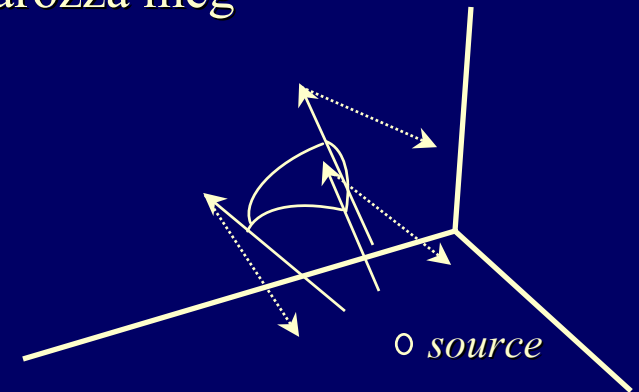
- a gömbalakú hullámfrontot pontos felületdarabok írják le
- a hullámfelület-darabok útját a középvonal határozza meg
- detektáló pont

Előnyök

- pontos időzítés és irány
- az RTM és MISM ötvözete a CTM javítása

Hátrányok

- térbeli felbontás romlása - “egyfajta statisztikusság...”





Geometriai modellek - algoritmusok V.

Kombinált modellek

- MISM a korai visszaverődésekhez
- RTM a későbbi visszaverődésekhez, a “diffúz” szakaszhoz

Egyéb modellek

- “Particle-tracing”
- mintavételezett hullámkövetés
- ...

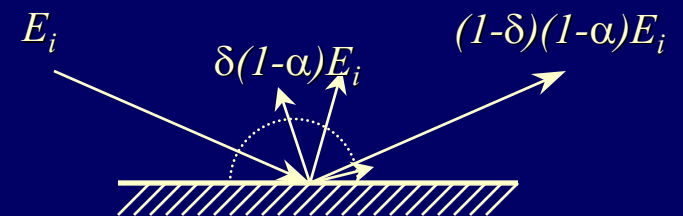
Geometriai modellek - kiegészítések I.

Diffúz visszaverődés

...diffúz energiahányad együtthatója

Módszerek

- véletlen
- Lambert-féle koszinuszos



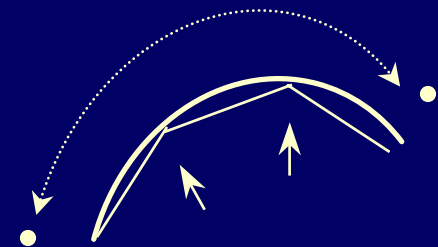
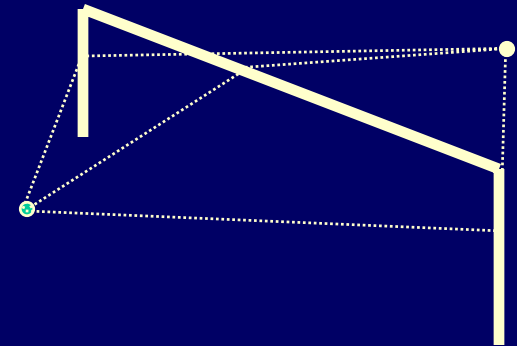
Geometriai modellek - kiegészítések II.

Diffrakció

...éldiffrakció

Módszerek

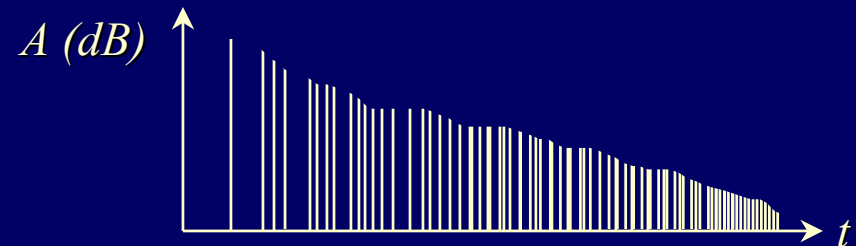
- éldiffuzitás
- Kurze-Anderson képlet



Geometriai modellek - eredmények feldolgozása I.

Közvetlen eredmény: echogram

- detektált echo-k időzítése
- detektált echo-k iránya



Tárolt eredmény: a visszaverődések útja (“history”, “path”, stb.)

- melyik forrás melyik irányából
- milyen felületek milyen szögű érintésével, mikor verődött vissza

Tartalom

- a detektált energia időbeli eloszlása egy frekvencián



Geometriai modellek - eredmények feldolgozása II.

Mérhető paraméterek számítása...

- echogram sávkorlátozása
- sávkorlátozott echogramok összeadása (impulzusválasz)

Auralizáció

- egy- vagy többcsatornás felvétel modellezése
- egy- vagy többcsatornás lehallgatás
- binaurális (HRTF) vagy hangtér modellezés



Geometriai modellek - eredmények feldolgozása III.

Megjelenítés

- echogram
- impulzusválasz
- lecsengési görbe
- számított paraméterek táblázatban
- számított paraméterek értékeinek eloszlása vevőpontok hálóján
- irányok szerinti megjelenítés
- meghallgatás...

Geometriai modellek - hibák

Modellezési módszer főbb hibái

- a hullámjelenségek csak közelítve
- forrás és vevő leírása (ideális pont?)
- csak sík felületek visszaverődéskor (fókuszálás, szórás?)
- felületek paraméterezettsége (transzparencia, irányfüggő visszaverődés, irányfüggő diffúz visszaverődés, stb.)

Modellezési paraméterek hibái (felhasználói beállítások is)

- geometria
- forrás és vevő iránykarakterisztikája
- felületek paraméterei



RAYNOISE I.

Modellezési módszer

- forrás és vevő pont/vonal lehet, intenzitáskarakterisztika két síkon
- MSM, CTM és BTM keveréke
- csak sík felületek, számos formátum a geometria bevitelére
- diffúz modell: véletlen
- diffrakció modell: Kurze-Anderson választott éleken (tükörforrásokra is!)



RAYNOISE II.

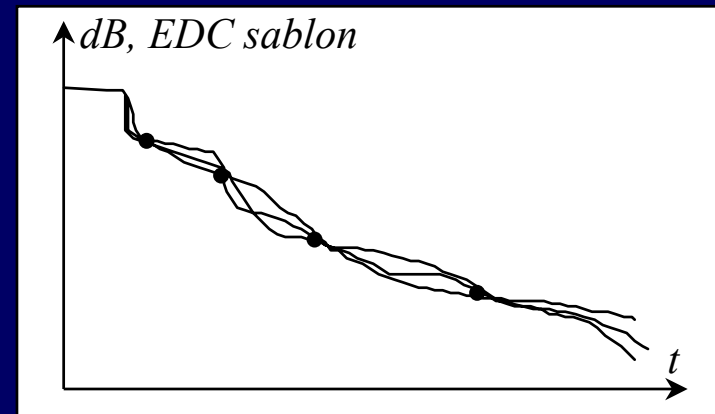
Modellezés folyamata

- geometria bevitele
- forrás és vevő beállítása
- felületek beállítása
- közeg beállítása
- statisztikus analízis (gyors sugárkövetéssel)
- modellezés (eredmények nélkül csak a kúp- vagy nyalábkövetés)
- utófeldolgozás (felületek, stb. hatásának számolása előbbiek alapján)
- eredmények megjelenítése (echogram, szintképek, stb.)
- auralizáció...

Teremakusztikai tervezés I.

Specifikáció

- teremakusztikai paraméterek megadása
- ezek pontokat vagy egymáshoz képesti helyzetét adják meg
- EDC sablon



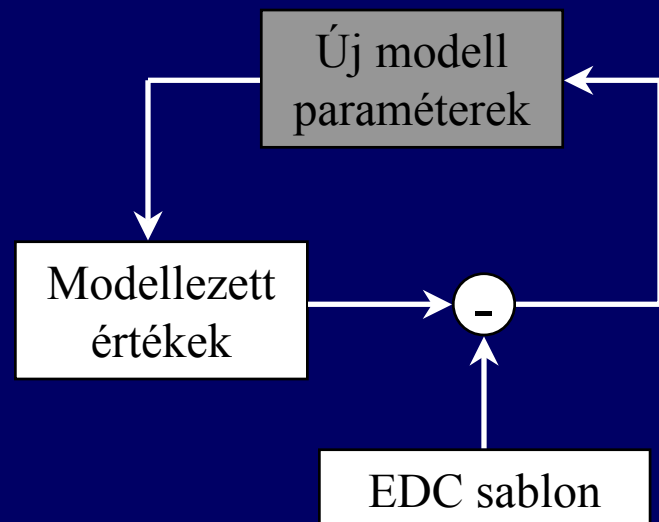
Teremakusztikai tervezés II.

Optimalizálás az EDC sablonra

- különböző változatok összehasonlítása
- az új változatok új modellparaméterek

Az optimalizálás lehet...

- az akusztikus tapasztalata,
- számítógéppel, véletlenszerűen, megadott toleranciák szerint.





Összefoglalás