

Számítógépes teremakusztikai modellezés

Computer Aided Modelling of Room Acoustics

Arató Éva, Magyar Rádió

Fürjes Andor, BME EVT Informatikai és Jelfeldolgozási Csoport

Összefoglaló - A cikk a teremakusztikai tervezésben használt sugárkövetéses számítógépes modellező eljárások alkalmazását mutatja be, részletesen leírja egy készülő, kísérleti jellegű modellező szoftver működésének alapjait, eddigi alkalmazásait, eredményeit.

Abstract - The paper shows applications of computer aided ray-tracing modelling methods, gives detailed description of a new experimental modelling system under development. This software has been used several times, so a short summary of examples and results is presented.

1. Bevezetés

A teremakusztikai tervezés feladatát H. Kuttruff [1] a hangszerkészítő mesteréhez hasonlítja. A hangszerkészítő célja is egyfajta hangzás kialakítása. Azonban a hangszerkészítő általában jól működő hagyományokat követ a hangszertest alakjával, míg egy teremakusztikus csak az építészeti kialakításhoz alkalmazkodhat; a hangszerkészítő eldobhatja rosszul sikerült próbálkozásait, míg a teremakusztikus legfeljebb magyarázkodhat, a nagyságrendekkel nagyobb értékű, de rosszul sikerült termet nyilván nem érdemes lebontani...

Tehát a teremakusztikusnak az építészeti kialakítással összhangban kell javaslatokat tennie a kívánt igényeknek megfelelő akusztikai viszonyok eléréséhez szükséges építészeti beavatkozásokra. Kézenfekvő ezek után olyan olcsó, már a tervezési szakaszban is használható eljárások keresése, amikkel előre megbecsülhetők adott helyzetekben a terem akusztikai minőségi jellemzői.

Az akusztikai rendszereket a hullámegyenlet általános megoldásai alapján alapvetően kétféleképpen lehet vizsgálni. A frekvenciatartománybeli vizsgálat az ismert Helmholtz-egyenletre vezet:

$$(1) \quad \Delta p + k^2 = g.$$

Ennek adott teremre mint zárt üregre való alkalmazása a peremfeltételek bonyolult rendszerét adja. A homogén megoldás ekkor a módusok keresését jelenti, tetszőleges g gerjesztés esetén pedig azok szuperpozícióját adja.

Az időtartománybeli megoldások az energia áramlását írják le, ezt az "energiasugárzási sűrűség" (egységnyi felületre másodpercenként érkező hangenergia), B integrálegyenletével fejezhetjük ki, feltéve hogy a határoló felületek a zárt helyiségben ideálisan diffúz módon szórják a hangenergiát

$$(2) \quad B(\vec{r}, t) = \int_S K(\vec{r}, \vec{r}') \rho(\vec{r}') B(\vec{r}', t - R/c) dS' + B_0(\vec{r}, t)$$

ahol $R = |\vec{r} - \vec{r}'|$ a fal \vec{r} és \vec{r}' pontjainak távolsága, dS' a ρ visszaverődési együtthatójú felületdarab az \vec{r}' pontban, $K(\vec{r}, \vec{r}') = \cos \vartheta \cos \vartheta' / \pi R^2$ a diffúz visszaverődés feltétele (Lambert-törvény), végül B_0 a közvetlen hang [2]. Ha B ismert, az intenzitás és az energiasűrűség a helyiség bármely pontjában számolható.

Belátható, hogy az (1) és (2) egyenletek csak nagyon egyszerű esetekben vezetnek zárt megoldásra, ezért valamilyen közelítésre van szükség.

A valós hangterjedést egyszerűsítő, "modellező" eljárások például az első visszaverődések vagy hullámfrontok papíron történő ábrázolása vagy a megépített arányos modell akusztikai vizsgálata. A számítógépes modellek túlnyomó része a geometriai hangterjedést feltételezve a tükörforrások vagy a sugárkövetéses módszert alkalmazza. Ez nyilván korlát a modell érvényességét tekintve, hiszen általában azt lehet mondani, hogy a hangterjedés és visszaverődés közel geometriainak akkor tekinthető, ha az akadályok mérete a hullámhosszhoz képest "nagy".

A számítógépes modellek másik nagy csoportja a bemutatott egyenletek numerikus megoldásai, melyek térbeli vagy időbeli diszkrétizálás után egyszerű lineáris egyenletrendszerre vezetnek. Az akusztikai tér felbontása a véges- és peremelem módszerek, az időbeli felbontás pedig a véges differenciák és iteratív módszerek alapjai. A diszkrétizálás miatti frekvenciakorlát minél nagyobb felbontást tesz kívánatosná, azonban a nagy számítási igény a gyakorlatban egyenlőre csak a kisfrekvenciás tulajdonságok vizsgálatát teszi lehetővé.

A "közepes" frekvenciatartomány vizsgálatára még nincs elterjedt gyakorlat, de próbálkoznak például a két módszer illesztésével [3]. Egyszerűségük és szemléletességük miatt leggyakrabban a geometriai modelleket alkalmazzák, amik az eredményül kapott impulzusválaszokat és az azokból számítható,

általánosan elfogadott minőségi jellemzőket is jól közelítik.

2. A sugárkövetéses modellek

A geometriai akusztikában a hullám fogalmát a hangszög váltja fel, ami a síkhullámhoz hasonló idealizáció. A sugárkövetéses (ray-tracing) modellek lényege, hogy a hangforrás pozíciójából egyenes eloszlású térszögekben adott intenzitású hangsugarak indulnak a hangforrásra jellemző iránykarakterisztika szerinti súlyozással, ami például gömbsugárzó esetében azonosan egységnyi minden irányban. A hangsugarak haladásuk közben a közegnek és a megtett útnak megfelelően csillapodnak. A visszaverő felületeken a sugarak a beesési merőlegesre nézve azonos szögben verődnek vissza, amitől a felületre jellemző szórási statisztikák szerint eltérhetnek, illetve szintén csillapodnak. Végül egy detektáló felületen (pl. sík, gömb) adott idő alatt áthaladó sugarakat számlálja a modell a vevő pozícióján.

Az eredményül kapott statisztika nem feleltethető meg közvetlenül az impulzusválasznak, ráadásul a számlálási idő miatti felbontás nem teszi lehetővé az igen fontos első visszaverődéseknél jelentkező erős, független visszaverődések teljes elkülönítését. Erre kínál megoldást a geometriai akusztikában jól ismert tükörforrásokat (image source) kereső módszer, ami a sík felületeket egyfajta "tükörnek" feltételezve a tükörben látható virtuális hangforrások összegzésével modellezi a vevő helyén az impulzusválaszt. Bár ez a modell pontos információt ad a visszaverődések irányáról, amplitúdójáról és beérkezésének idejéről, szintén csak korlátozásokkal alkalmazható: tükörforrás csak sík felületeken értelmezhető, az idő függvényében exponenciálisan nő a detektált tükörforrások száma, végül külön eljárás szükséges a vevő pozíciójából "nem látható" tükörforrások kiszűrésére.

Fentiek miatt a korszerűbb modellező eljárások a két modellt egyesítve alkalmazzák: a modellezett impulzusválasz korai szakaszát például a sugárkövetéses módszerrel keresett tükörforrásokból, míg későbbi, diffúzabb szakaszát a sugárkövetéses statisztikából valamilyen eljárással kapott "ekvivalens impulzusválaszból" számlálják [4]. Megoldás lehet utóbbira például a magasabb rendű visszaverődések irányának teljesen véletlenné tétele [5].

A forrás és a vevő pozíciójára és jellegére, illetve a teremre jellemző modellezett impulzusválasz feldolgozható a kívánt és elfogadott jellemzők számolásához, amikből azután következtetni lehet a szubjektív élmény minőségére. Ilyen ismertebb jellemzők például a különböző zengési idők (EDT, RT₆₀, RT₅₋₂₅, RT₅₋₃₅), a hangtisztaságra jellemző Clarity (C₈₀), Deutlichkeit (D), Lateral Energy

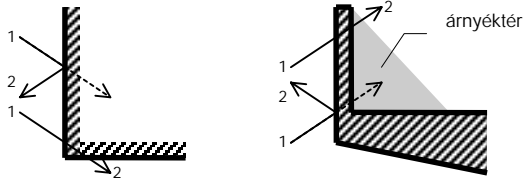
Fraction (LEF) [6]. Nyilván sokkal szemléletesebb a számított impulzusválasz tetszőleges hangjellel való konvolúciójából kapott hang vizsgálata, ami elméletileg a helyiség hangzását nyújtja közvetlenül. A konvolúció után a kétfülű vagy modellezett "mikrofonos" hallás feldolgozását nevezik auralizációnak. Modellezett vagy mért impulzusválaszból konvolúcióval zengető szoftverek léteznek (pl. Sound Forge 4.0 - Acoustics Modeler Plug-In), de létezik már mindezt valós időben működtető opció moduláris effektrendszerbe is (TC Electronic M5000 Digital Mainframe - ODEON-SOUND opció [7], vagy Lake DSP Convolver - CATT).

3. Az alkalmazott eljárás részletei

A szerzők által alkalmazott, megjelenítése miatt "ping-pong labda modellnek" nevezett eljárás létrehozásának elsődleges célja valós időben működő zengető algoritmusok kutatásához szükséges impulzusválaszok generálása volt. Az eljárás tulajdonképpen a sugárkövetéses eljárások úgynevezett "kúpkövetéses" (cone-tracing) változatát alkalmazza: a forrásból kiinduló gömb alakú, impulzusjellegű gerjesztésnek tekinthető hullámfront a gömb felületén egyenletesen elosztott, a gömb felületének darabját képviselő "impulzusokból" áll.

Az impulzusok intenzitása a forrás iránykarakterisztikájával súlyozott SPL értékből adódik, sebessége azonos a hullámterjedési sebességgel, irányát a visszaverő felületek a geometriai akusztika szerint módosítják. A pontszerű vevő az impulzust akkor detektálja, ha annak gömbsüvege metszi a vevő pozícióját. Érdemes megjegyezni, hogy ebben a formában a gömbfelületdarab tulajdonképpen térbeli bizonytalanság a detektálásban, hiszen alakja nem torzul ha a visszaverő felület nem sík vagy egyszerű él, ugyanakkor a felületdarab idővel növekedő átmérője végeredményben a szükséges diffúzitást biztosíthatja.

A modell másik különlegessége, hogy a hangsugarak számítása időben mintavételezett módon történik. Ez azt jelenti, hogy pl. a 250Hz-es tartomány vizsgálatánál az algoritmus 500-600Hz-es mintavételezéssel és annak megfelelő pozíciókban keresi csak a visszaverő felületekkel való ütközéseket, azaz nem veszi észre a "kis" akadályokat. Ez a megközelítés egyrészt a szemléletes megjelenítést segíti, másrészt az elhajlás jelenségét próbálja utánozni, hiszen így az impulzus útját gyakorlatilag nem módosítják a hullámhossz felénél kisebb méretű akadályok. A modell implementálásánál a térbe benyúló, lap-szerű akadályok vizsgálata egyfajta "árnyékkeret" feltételez, ami az éltől távolodva csökkenti az impulzus átjutásának esélyét (1. ábra).



1. ábra: Mintavételezés hatása egyetlen lépésben
(a vastag nyíl a kalkulált hangút) -

Effect of sampling in searching for reflections in one step
(the thick line is the calculated ray-path)

Ez az időbeli mintavételezés a felületdarabot adott vastagságú felület-héjjá alakítja, tovább növelve a detektálás bizonytalanságát, ami az impulzusválasz mintavételezett változatához vezet. Ez azt is jelenti, hogy jó időbeli felbontást csak nagy mintavételi frekvenciájú számolással lehet elérni, mert kis mintavételi gyakoriságnál az egyébként különálló visszaverődések detektált impulzusai összeolvadnak, viszont elegendően nagy felbontással vagy a mintavételezés elhagyásával a tükörforrások módszerét megközelítő pontosságot lehet elérni. A mintavételezés megkönnyíti továbbá az olyan, egyébként csak speciális helyzetekben fontos jelenségek modellezését is, mint a légmozgás vagy a hőmérsékletváltozás okozta elhajlás.

Különleges, szabályos vagy durva, de nem részletezett felületek szóró hatását a normál iránytól való véletlen eltéréssel és az iránybeli bizonytalanságot jelentő felületdarab átmérőjének növelésével veszi figyelembe a modell. Speciális megközelítést igényel ugyanakkor például a nézőközönség hatásának modellezése, amihez a nézők sűrűségének megfelelő közepes úthosszú és véletlen szórású definíciót kell definiálni a nézők átlagos magasságával, testhelyzetével (álló vagy ülő) összhangban, de kiegészíthető ez a nézők körüli hőmérséklet- és ezért hangsebesség-változás számításával is. A telepített elektroakusztikai rendszerek vizsgálatához lehetőség van több adott iránykarakteristikájú irányított, szükség szerint késleltetett hangforrás elhelyezésére és egyidejű vizsgálatára is.

A modellező program jelenlegi állapotában számolás közben képes megjeleníteni a hullámfrontot képviselő impulzusokat, azok mozgását a helyiségben. Szükség esetén kívánt nézetből az impulzus által képviselt energiaeloszlást ábrázoló adatsorozat is rögzíthető, ami utólag pl. MatLab programcsomaggal feldolgozható, animálható.

4. Alkalmazási példák

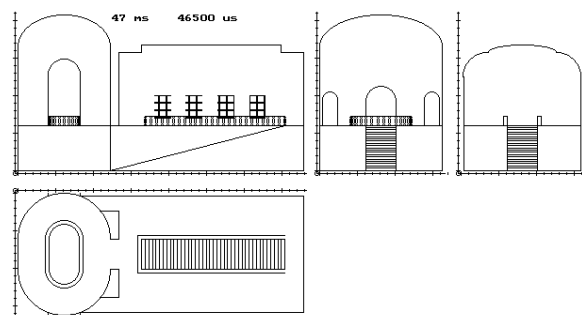
Az elmúlt másfél évben különböző célú tervezéshez több alkalommal volt szükség a program használatára. Ez a rész ezek közül néhány feladat részleteit, eredményeit mutatja be röviden.

4.1. Mezőgazdasági Múzeum, Vajdahunyadvár

A feladat a műemlék jellegű fogadóterem elektroakusztikai rendszerének tervezése, telepítése és beállítása volt. A terem zengési ideje beszéd tartományban 8 másodpercnél nagyobb volt, ami igen rossz beszédérthetőséget okozott, ezért vált szükségessé az ellenőrző modellezés. Az elektroakusztikai rendszer alapötlete több fronton elhelyezett, irányított oszlopsugárzók alkalmazása volt. Ezek elhelyezését, irányítottóságát, késleltetésük beállítását és megváltozott körülmények (pl. nézők, függönyök) közötti viselkedését kellett a modellel becsülni.

A modell elkészítésénél a legnagyobb feladatot a három, boltívekkel, erkéllyel és lépcsőházzal csatolt helyiség peremfeltételeinek meghatározása jelentette (2. ábra). Mivel az alkalmazott eljárás nem korlátozza csak síkokra a lehetséges határoló felületek készletét, az elliptikus kupola vagy az ívesen illeszkedő boltívek hatásai pontosan voltak modellezhetők. Az oldalsó körfolyosókat kialakításuk miatt teljesen elnyelők lehetett tekinteni. A modell működését gyorsította az az egyszerűsítés, amit a terem és a hangsugárzók hossz tengely menti szimmetriája tett lehetővé.

A modell jól mutatta az íves és erősen visszaverő felületek koncentráló hatásait, így valóban indokoltá vált az irányított oszlopsugárzók alkalmazása. A késleltetéseket és csillapításokat úgy kellett meghatározni, hogy a fix beszélő pozíciótól távolodva három, függetlenül késleltetett és szintezett hangsugárzó-pár működése csak támogassa, ne színeze a forrást. A beszélő pozíciója mögött két további, nem késleltetett, rejtett sugárzó hasonló feltételekkel lett szintezve. A modellel becsült beállításokat meghallgatással finomítva az elektroakusztikai rendszer működése a várakozásokat felülmúlva növelte a beszéd tisztaságát és -érthetőségét.

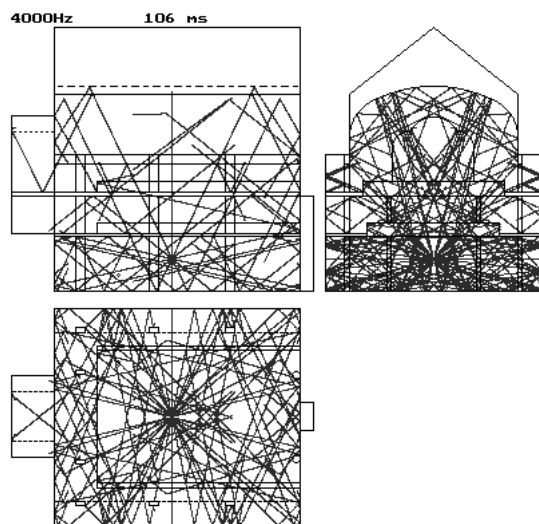


2. ábra: A Mezőgazdasági Múzeum fogadóterem nézetei -
Views of the hall in the Agricultural Museum

4.2. Kazinczy utcai Izraelita zsinagóga

A feladat a szintén műemlék jellegű, romos állapotú zsinagóga hajdani akusztikai viszonyainak rekonstrukciója volt, amin szükség esetén a felújítás során korrigálni lehet majd. A fő kérdés a leomlott íves mennyezet hatása volt (3. ábra).

A modell újdonsága itt az impulzusválasz meghallgatásának lehetősége volt. A ORTF mikrofonozási technika szimulációjának alkalmazásával, fejhallgatós meghallgatással az eredeti célnak megfelelően a zengés is valóban vizsgálhatóvá vált. A 8kHz-es mintavételi frekvenciával vett modellezett impulzusválaszban az elkülönülő korai visszaverődéseket erősen diffúz zengés követte, illetve a tér- és irányérzet is meglepően élethű volt mindkét szakaszban. A modellezés eredményeként javaslatot lehetett tenni a hangolt rezonátorokkal ellátott mennyezet méretezésére is.



3. ábra: A zsinagóga nézeti hangutakkal - Views of the synagogue with ray-paths

4.3. Békéscsabai Ifjúsági Ház színházterem

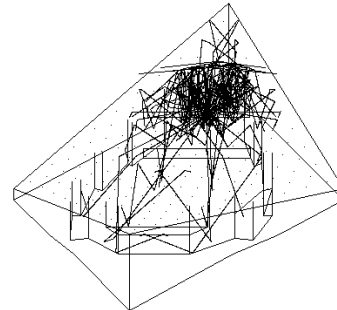
A feladat különlegessége a mennyezet ésszerűnek nem mondható "nyerges" kialakítása volt (4. ábra). A tervekől azonnal sejthető, hogy a nézőtér legnagyobb részét nem érheti el elegendő hangenergia. Ezen a problémán csak akusztikai hangterelőkkel, módosított burkolóanyagokkal valamint elosztott elektroakusztikai hangrendszerrel lehet segíteni (5. ábra).

Mivel a mennyezetet leíró görbe teljes negyedfokú egyenletére az azt metsző hangsugár egyenesének metszéspontja nem számolható gyorsan, közelítő eljárásra volt szükség a kisebb frekvenciákon, amikor az impulzusok lépéstávolsága alatt a görbület túl nagy változása az egyszerű véges-differencia modell "elszállásához" vezetett volna.

A modell fő feladata így a hangterelőkkel kombinált elektroakusztikai rendszer jóságának vizsgálata volt

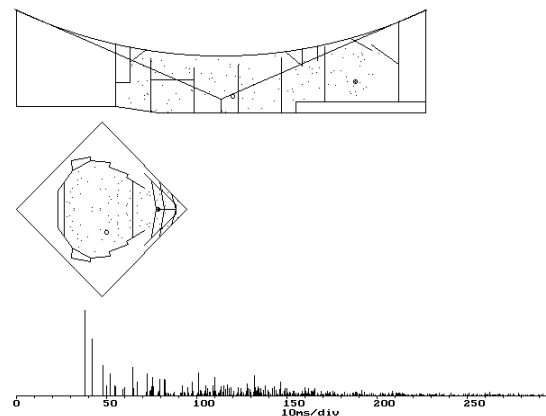
különböző hallgatási pozíciókban. A fő kérdés az volt, hogy egy adott hangterelő milyen szögben és pozícióban, illetve milyen elhelyezésű és teljesítményű hangsugárzók nyújtják az eredeti állapotokhoz képes a legnagyobb javulást például a zengési időkből vagy a hangtisztaságban.

f=4000Hz RH:60% 94 ms 94124 us



4. ábra: A békéscsabai színházterem nézeti hangutakkal - The theatre hall in Békéscsaba with ray - paths

f=4000Hz RH:60% 383 ms 383249 us



5. ábra: A békéscsabai színházterem oldal- és felülnézetei, terelőekkel, impulzusválasszal - Views of the theatre hall with sound deflectors in Békéscsaba while calculating the impulse response

5. A modellezés egyéb vonatkozásai

A számítógépes teremakusztikai modellezés az igen egyszerű és durva közelítésektől eltekintve jó eredményt adhat, ha az anyagállandók pontosan ismertek. Ehhez az akusztikai mérés technika fejlődése is elengedhetetlen. Jelen állapotban a modellezés folyamata csak úgy tekinthető korrektnek, ha a modell elkészítését néhány kalibráló mérés követi. Bár lehet általában adott anyag típusok jellemzőit mérni, paraméter-könyvtárakat készíteni és azokat felhasználni, a beépített valóságot modellező program első megközelítésre akkor sem tekinthető feltétlenül pontosnak, hiszen a szimuláció tulajdonképpen közelítő statisztikus modell.

A sugárkövetéses eljárások legfontosabb jellemzői, hiányosságai:

- a) a sugarak száma: nyilván minél több sugarat, azaz irányszöveget vesz figyelembe a modell, annál pontosabb tud lenni a kisebb felületek hatását is szimuláló program. A gyakorlatban a szükséges sugarak száma függ a helyiség méretétől, a fontos felületek méretétől. Általában azt lehet mondani, hogy ha a sugarak száma a felületek számának 25-100-szorosa, a sugarak számától független, stabil eredmény kapható [6].
- b) geometria: a helyiség geometriájának leírása létfontosságú. A modellek egy része csak síkokat alkalmaz, más része görbült felületekkel is számolhat, de általában a csak harmadfokúnál nagyobb fokszámú polinomokkal leírható görbe felületek nehezen számolhatók és különleges közelítéseket igényelnek, mert a sugarak egyenesének metszéspontja és így beesési szöge is csak becsülhető.
- c) elnyelés: az alkalmazott modellekben a csillapítások nem irányfüggők, a visszaverő felületek tökéletesen merevek, ami nyilván csak igen egyszerű közelítése a valóságnak.
- d) különleges körülmények: a nézők vagy zenekarok hatása sem teljesen tisztázott, a modell nyilván csak durva közelítés.
- e) geometriai akusztikával nem leírható jelenségek: a diffrakció és refrakció jelensége a hagyományos sugárkövetéses eljárással nem modellezhető, az alkalmazott mintavételezett modell alkalmazhatósága pedig különösen a diffrakció esetében kérdéses.
- f) detektálás, feldolgozás: a detektálás módja és a detektált impulzusválasz feldolgozásának folyamata nem minden esetben egyértelmű. Ehhez egyrészt a mért és modellezett impulzusválasz egyeztetésének feltételeit kell rögzíteni (a modellezett unipoláris impulzusválasz például hogyan feleltethető meg a mért bipoláris impulzusválasznak), másrészt az impulzusválaszból származtatott jellemzők értékelésének módját szükséges ismerni (melyik

jellemző adott értéktartománya milyen minőségnek felel meg).

- g) auralizáció: a szubjektív minőségi jellemzők megállapításának legegyszerűbb módja a meghallgatás, azonban az értékelhető sztereó impulzusválasz generálása külön feladat, ha valódi 3D hangzás, azaz fent-lent érzet kialakítása a cél, ami attól függően is változhat hogy a meghallgatás hangsugárzó-rendszeren vagy fejhallgatón történik [7].

A számítógépes modellező rendszerek másik igen fontos része megfelelő kezelői felület kialakítása. A modellező szoftvernek például lehetővé kell tenni tetszőleges geometriájú helyiség bevitelét. A legegyszerűbb megoldás nyilván már létező építészeti vagy tervező CAD programok kimeneti adatait felhasználni. Sajnos a bevitel ebben az esetben sem automatizálható teljesen, ugyanis a szoftver nem tudja a szükséges egyszerűsítéseket magától elvégezni.

A szoftver olyan hasznos funkciókkal bővíthető, amik nagyban segíthetik a tervező akusztikus munkáját. Ilyen lehet például választott irányú vagy rendű hangutak megjelenítése, kijelölt felület visszaverődéseinek független vizsgálata, esetleg adott visszaverődés kiválasztása, útjának megjelenítése az impulzusválaszból.

6. Összefoglalás

A különböző teremakusztikai tervezést segítő, modellező szoftverek az utóbbi években váltak elérhetőbbé, megbízhatóbbá. Sokszor alkalmasak igen pontos szimulációra, azonban a legjobb modell sem helyettesíti a hozzáértő akusztikust, hiszen ellenőrző mérések és kalibrálás, beállítások nélkül a vázolt eljárások is csak durva becslést adhatnak [8].

A valósidejű zengető algoritmusok kutatására készített saját modell megbízhatóságát csak további mérések erősíthetik meg, bár az a meghallgatások és az eddigi tapasztalatok alapján is ígéretes lehetőségeket nyújt.

Irodalomjegyzék

- [1] K. H. Kuttruff - Room Acoustics (Applied Science Publishers Ltd., 1979., ISBN 0-85334-813-8)
- [2] K. H. Kuttruff - Sound Field Prediction in Rooms (15th International Congress on Acoustics, 1995. Trondheim)
- [3] E. Granier, M. Kleiner, B. Dalenbäck, P. Svensson - Experimental Auralization of Car Audio Installations (AES Journal, 1996. October, 835-849)
- [4] K. H. Kuttruff - Auralization of Impulse Responses Modeled on the Basis of Ray-Tracing Results (AES Journal, 1993. November, 876-880)
- [5] ODEON Calculation Principles (ODEON Manual)
- [6] Graham Naylor, Jens Holger Rindel - Predicting Room Acoustical Behaviour with the ODEON Computer Model (124th ASA Meeting, New Orleans, 1992.)
- [7] J. H. Rindel, C. Lyngé, G. Naylor, K. Rishøj - The use of a Digital Audio Mainframe for Room Acoustical Auralization (96th AES Convention, Amsterdam, 1994.)
- [8] Arató Éva, Fürjes Andor - Teremakusztikai modellezés (2. Akusztikai nap, 1997. június)