

Osnove geometrijskega modeliranja akustike prostora

Rok Prislan

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Jadranska 19, 1000 Ljubljana, Slovenija
rok.prislan@gmail.com

Principles of geometrical room acoustic modelling

Geometrical room acoustic modelling is broadly in use for professional room acoustic design. Therefore it is important to understand its main principles and concepts which are presented together with several aspects of the computer implementation of the method. Furthermore, the validity of the method in the low frequency range is presented. In fact, erroneous results are produced when sound diffraction and scattering have a significant influence on the sound field in a room. Nevertheless, the method can be applied in the low frequency range for certain room geometries which is supported by presenting simulation results of resonances in a rectangular room.

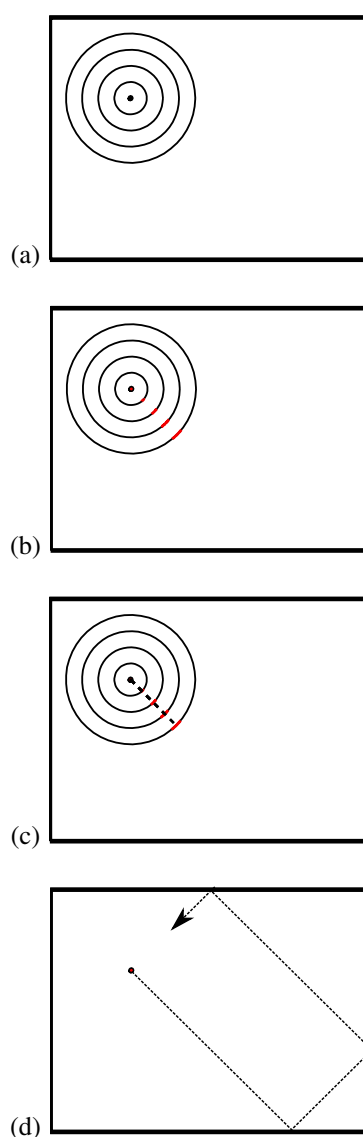
I. Uvod

Po navedbah Kuntruffa [1][str. 300] segajo začetki računalniškega modeliranja akustike prostora več desetletij nazaj in za katere naj bi bil zaslužen M. Schroeder. Toda računalniška tehnologija je postala širše dostopna veliko kasneje in šele v devetdesetih letih so se pojavili prvi komercialni računalniški programi (npr. Odeon [2] leta 1991), ki so bili namenjeni izključno modeliranju akustike prostora. Namenski programi so s časom pridobivali na funkcionalnosti in do današnjega dne postali uporabno orodje namenjeno modeliranju akustike prostora. Istočasno pa je tekel tudi razvoj algoritmov in se dvigala razpoložljiva računska moč, s čimer so postajali rezultati računalniških simulacij tudi bistveno bolj relevantni, računski časi pa krajši. Kljub temu nekatere omejitve ostajajo, saj izhajajo iz najbolj osnovnih predpostavk na katerih geometrijsko modeliranje temelji.

II. Osnove geometrijske akustike

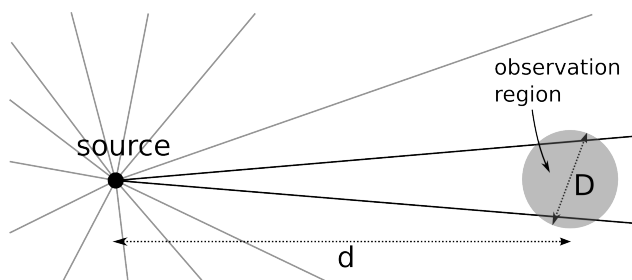
Analogno kot v geometrijski optiki je tudi v geometrijski akustiki propagacija valov nadomeščena s premočrtnim gibanjem žarkov. Upravičenost takšne reprezentacije temelji na ikonalni aproksimaciji, ki velja v območju visokih frekvenc [3][str. 371-388]. V akustičnem primeru so takšni žarki imenovani zvočni žarki in z njimi je modelirano širjenje zvočnega vala iz točkastega izvora kot izotropno premočrtno širjenje žarkov s konstantno hitrostjo (hitrostjo propagacije zvoka) iz točke v prostor.

Shematska razlaga uvedbe žarkov je prikazana na sliki 1.



Slika 1: Shematski prikaz točkastega zvočnega izvora v dvodimenzionalnem pravokotnem prostoru. Iz izvora se zvočni valovi širijo kot koncentrični krogi (a). Ob opazovanju območja konstantne faze (b) izhaja, da je širjenje tega premočrtno (c), ki je zato lahko nadomeščeno z ravnim žarkom, ki se širi iz izvora in skladno s pravili geometrijskega odboja interagira z mejnimi površinami prostora (d).

Na sliki 1 je zaradi nazornosti prikazan zgolj en sam žarek, med tem ko je za modeliranje celotnega točkastega izvora, potrebnih več žarkov, ki se izotropno širijo v vse smeri prostora (glej sliko 2). S tem ko se žarki širijo v prostor, njihova gostota pada, kar ustreza fizikalni realnosti padanja zvočne intenzitete z oddaljevanjem od izvora. Na sliki 2 je označeno tudi opazovano območje, ki bo predstavljeno kasneje, in prepotovana razdalja žarka d .



Slika 2: Shematski prikaz izotropnega širjenja zvočnih žarkov iz točkastega izvora v dveh dimenzijah. D predstavlja premer opazovanega krožnega območja, d pa prepotovano razdaljo žarka.

A. Interakcija žarkov z mejnimi površinami

Zvočni izvor je točka iz katere se širi določeno število žarkov. Število žarkov je parameter računalniške simulacije, z večanjem katerega, se napaka simulacije zmanjšuje¹. Žarki se v praznem prostoru prosto širijo, kar pa ni zanimiv primer iz stališča prostorske akustike. Zanimivejši je primer, ko so prisotne mejne površine s katerimi žarki interagirajo in sicer tako, da se na njih zrcalno odbijejo (glej sliko 1 c). Pri tem izgubijo del svoje energije, zato se jim amplituda ob odboju spremeni. Podatek o amplitudi posameznega žarka se torej hrani za vsak žarek in v splošnem je to kompleksna in frekvenčno odvisna količina, ki je odvisna od vpadnega kota in impedance mejne površine. Žal pa tako podrobnih podatkov o interakciji zvočnega polja z materialom najpogosteje ni na voljo in so poznani zgolj koeficienti absorpcije zvoka α , ki predstavlja delež energije vpadnega zvočnega vala, ki se ob upadu na mejno površino absorbira. Ta parameter se po standardiziranih meritvenih postopkih za material tudi izmeri (npr. ISO 354 [4]).

Žarki se lahko od sten večkrat odbijajo in v praktični računalniški implementaciji, se njihova propagacija prekine, ko njihova energija pade pod določeno mejno vrednost. Na tem mestu velja opozoriti, da so rezultati simulacij, ki obravnavajo zgolj zrcalne odboje, pomanjkljivi [5]. Mejne površine v prostoru namreč niso idealno ravne, temveč imajo svojo reliefno strukturo. Ta povzroči, da je odboj zvočnega vala vsaj delno difuzen. Za ovrednotenje tega so bili uvedeni koeficienti difuznosti [1][str. 275] materiala, s katerimi je definirana reliefna grobost posameznega materiala. Z njimi je določen delež zvočne energije, ki se na mejni površini odbije zrcalno,

¹Napake, ki so metodi inherentne, ostajajo prisotne tudi ob povečanju števila žarkov.

med tem ko se njen preostanek odbije po predefiniranem smernem vzorcu. V tehničnem smislu računalniške implementacije je difuzni odboj lahko implementiran tako, da se ob odboju ustvari nov žarek, ki se odbije difuzno, lahko pa tudi kot naključni proces, pri katerem z dano verjetnostjo pride do zrcalnega ali difuznega odboja.

B. Opazovana točka in akustične lastnosti prostora

Če razumemo točkasti izvor kot mesto postavitve zvočnega izvora, je opazovano območje točka umestitve mikrofona, v kolikor bi meritev izvajali v realnosti. Takšno območje je definirano v sklopu računalniške simulacije in poiskani so žarki, ki ga prečkajo. Zanje je poznana amplituda B_i in čas preleta v obliki prepotovane poti d_i . Začetna amplituda žarka B_0 pred prvim odbojem na mejnih površinah je vedno enaka 1. S temi žarki je moč rekonstruirati impulzni odziv prostora $s(t, \mathbf{r}, \mathbf{r}')$ za dano točko izvora \mathbf{r} in mikrofona \mathbf{r}' po enačbi

$$s(t, \mathbf{r}, \mathbf{r}') = A \sum_{i=1} B_i \cdot \delta(t - d_i \cdot c). \quad (1)$$

Pri tem i teče po vseh žarkih, ki zaidejo v območje, c je hitrost širjenja zvoka, A pa faktor normalizacije, ki je odvisen od parametrov simulacije, kot so število žarkov, število prostorskih dimenzij simulacije in velikost opazovanega območja. Podrobnejša interpretacija faktorja A presega namen članka.

Impulzni odziv prostora je časovna funkcija, ki v celoti opisuje lastnosti prostora. Tega se tudi v realnosti meri [6] in na njegovi osnovi se lahko izračuna večina akustičnih parametrov prostora, kot jih npr. definira standard ISO-3382 [6]. Kako se iz impulznega odziva npr. izračuna odmevni čas, je v svojem temeljnem članku prvi pokazal M. Schroeder [7], kamor je napoten zainteresiran bralec.

Omeniti velja še, da je reprezentacija impulznega odziva v frekvenčnem prostoru *frekvenčni odziv prostora*. To je omenjeno zato, ker se v praksi izkaže kot bolj priročno seštevanje prispevkov po enačbi (1) v frekvenčnem prostoru, kot je npr. narejeno v [8].

III. Energijske metode

Energijske metode geometrijskega modeliranja akustike prostora naredijo dodatno aproksimacijo in sicer, tako da zanemarijo kompleksno amplitudo posameznega žarka in namesto te beležijo zgolj njeno absolutno vrednost. S tem se informacija o fazi valovanja zavrže in namesto impulznega odziva prostora simulacija vrne *reflektogram*. Takšna aproksimacija je smiselna ob upoštevanju že omenjenega dejstva, da so geometrijske metode upravičene zgolj v visokofrekvenčni limiti, ko je upravičena ikonalna aproksimacija.

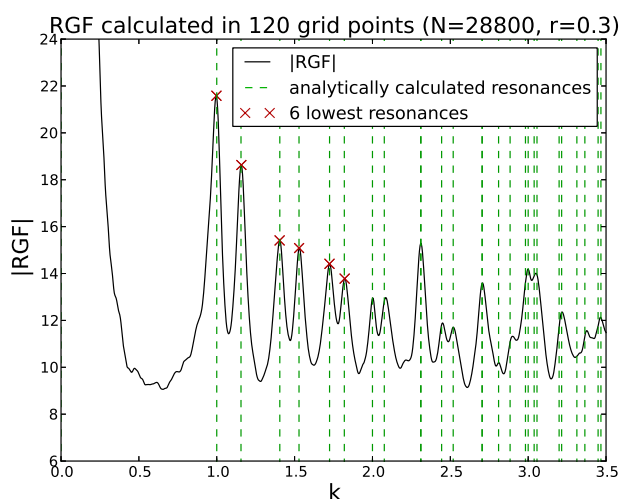
S takšno miselnostjo se geometrijske metode pogosto tudi kar enači z energijskimi, kar pa je napačno. Poleg tega so napake zaradi ikonalne aproksimacije v nižje frekvenčnem območju selektivne, saj do njih ne prihaja pri vseh geometrijah prostora. V tem smislu so energijske

metode bistveno bolj okrnjena izpeljanka geometrijskih metod.

IV. Območje uporabe geometrijskih metod in primer njihovega delovanja v nižje frekvenčnem območju

Kot je bilo že omenjeno je uporaba geometrijskih metod omejena na visokofrekvenčno območje. Pri nizkih frekvencah so namreč valovne dolžine dolge in, v kolikor so primerljive z velikostjo objektov, ki omejujejo prostor, geometrijske metode vračajo napačne rezultate, saj ne upoštevajo sipanja na takšnih objektih. Poleg tega dajejo geometrijske metode tudi napačne rezultate v prostorih s senčno geometrijo, saj izvzamejo uklonske pojave.

Razširitev frekvenčnega območja delovanja geometrijskih metod je predmet raziskav na področju geometrijskega modeliranja akustike prostora (npr. [8], [9]). Tako so na grafu na sliki 3 prikazani z geometrijsko metodo izračunana absolutna vrednost frekvenčnega odziva prostora kot povprečje frekvenčnih odzivov prostora modeliranih v 120 opazovanih območjih v pravokotnem prostoru dimenzije $a \times b \times c = \pi \times \exp(1) \times \sqrt{5}$. Radij opazovanega območja v simulaciji je znašal $r = 0.3$, število izsevanih žarkov pa je bilo $N = 28.800$.



Slika 3: Modelirane vrednosti resonančnih načinov v prostoru in analitično izračunane vrednosti. Razvidno je, da se v odzivu prostora pojavljajo vrhovi, ki dobro sovpadajo z analitično izračunanimi vrednostmi. Graf je vzeta iz [10].

Na grafu na sliki 3 so prikazane tudi analitično izračunane resonančne frekvence, ki so za pravokotni prostor poznane. Iz grafa je razvidno, da je ujemanje modelsko izračunanih vrhov z analitičnimi vrednostmi dobro. To kaže na možnost uporabe geometrijskih metod tudi v nižje frekvenčnem območju.

V. Različne računalniške implementacije

Zgoraj opisano je zgolj temeljni koncept, na katerem so geometrijske simulacije akustike prostora osnovane. Zainteresiran bralec je napoten na pregledni članek nad področjem, ki ga je pred kratkim napisal Vorlaender

[11], saj so v nadaljevanju zgolj naštetje nekatere izpeljanke.

Med najbolj znane metode spada metoda zrcalnega izvora (ang. *image source method*), ki temelji na postavitvi zrcalnih izvorov izven geometrije prostora. Bistvo metode je, da se modelirajo zgolj žarki, ki zaidejo v opazovano območje, ki je v tem primeru točka. Metoda je posledično hitrejša, a se pojavijo težave pri modeliranju difuznega odboja in v primeru neravnih mejnih površin. Poznane so tudi izpeljanke, ki namesto samostojnega žarka (ang. *ray tracing*) propagirajo istočasno več žarkov (ang. *beamtracing*), ki lahko napenjajo tudi piramidalne oblike (ang. *piramide tracing*) ali stožce (ang. *cone tracing*). Kot poslednje velja omeniti še hibridne metode, ki zgodnje odboje (ang. *early reflections*) modelirajo geometrijsko, med tem ko pozne odboje (ang. *late reflections*) aproksimirajo z že omenjenimi energijskimi aproksimacijami.

VI. Zaključki

Predstavljene so bile osnove geometrijskega modeliranja akustike prostora. Tako je bil predstavljen temeljni koncept, na katerem geometrijske metode temeljijo ter več aspektov računalniške implementacije. Izpostavljene so bile omejitve metode in predstavljeni rezultati pridobljeni z geometrijsko metodo, ki so prikazali njeno, sicer omejeno, uporabnost tudi v nižje frekvenčnem območju.

Literatura

- [1] H. Kuttruff, *Room Acoustics, Fourth Edition*, ser. E-Libro. Taylor & Francis, 2000.
- [2] ODEON, "Room acoustics software," Aug 2011. [Online]. Available: <http://www.odeon.dk/>
- [3] A. D. Pierce, *Acoustics - An Introduction to Its Physical Principles and Applications*. Melville, NY, USA: Acoustical Society of America (ASA), 1989.
- [4] "International organization for standardization, iso 354, "acoustics – measurement of sound absorption in a reverberation room""
- [5] J. H. Rindel, "The use of computer modelling in room acoustics," *Journal of Vibroengineering*, vol. 3, pp. 219–224, 2000.
- [6] "International organization for standardization, iso 3382, "measurement of room acoustic parameters""
- [7] M. Schroeder, "Die statistischen parameter der frequenzkurven von grossen räumen," *Acustica*, no. 4, pp. 594–600, 1954.
- [8] R. Prislan, "Ikonalni pristop k akustičnem modeliranju," 2009.
- [9] C.-H. Jeong and J. H. Rindel, "An approximate treatment of reflection coefficient in the phased beam tracing method for the simulation of enclosed sound fields at medium frequencies," *Applied Acoustics*, vol. 69, no. 7, pp. 601–613, 2008.
- [10] R. Prislan and D. Svenssek, "Geometrical modeling of the green's function of the wave equation in

closed space using the eikonal approximation,” *7th Forum Acusticum 2014 Krakow 7-12.09.2014*.

- [11] M. Vorlaender, “Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 133, no. 3, pp. 1203–1213, 2013.