

Metode merjenja odmevnega časa v prostoru

Rok Prislan

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

Reverberation time measurement methods

Reverberation time is the central room acoustic parameter introduced by Mr. W. C. Sabine in 1885. As part of the acoustic design it is used to define the target acoustic properties of a room and is computationally predicted. Furthermore, reverberation time can be measured as presented in the paper. As such, it is important for the supervision of the acoustic design and the fit out works. Two main reverberation time measurement methods are presented, i.e. the interrupted noise method and integrated impulse response method. The measuring procedure and the required signal processing for both methods is briefly explained and schematically presented.

I. Uvod

Na področju akustike je relevantnih več tipov meritev, ki obsegajo relativno preproste meritve fizikalnih količin (npr. zvočnega tlaka [2] ali moči [3]), kot tudi meritve akustičnih parametrov in akustičnih odzivov. Naprednejše meritve zahtevajo sočasno meritev v več legah, med katerimi gre naštetih meritev medušesne korelacijske funkcije (ang. *inter-aural cross correlation function* — IACF) [4], uporabo mikrofonskih polj [5] za lokalizacijo zvočnih virov, ali večmikrofonsko merilno metodo [6, 7], ki omogoča vizualizacijo modalnih oblik.

Meritev odmevnega časa natančno določa mednarodni merilni standard SIST EN ISO 3382-2 (*Akustika - Merjenje parametrov prostorske akustike - 2. del: Odmevni čas v običajnih prostorih (ISO 3382-2:2008)*). Ta podaja zahteve za uporabljeno merilno opremo (neusmerjen zvočni izvor, velikost mikrofonske diafragme), lege mikrofona in zvočnega izvora, za število oseb, prisotnih v prostoru, in uporabljene oktavne in terčne filtre (skladne s standardom IEC 61260). Pri tem lahko uporabimo različne merilne metode, ki se razlikujejo po potrebni obdelavi zajetih signalov in tudi točnosti izmerka. Najpogosteje uporabljeni metodi sta metoda prekinjenega šuma in metoda integriranega impulznega odziva, ki sta v nadaljevanju ločeno predstavljeni.

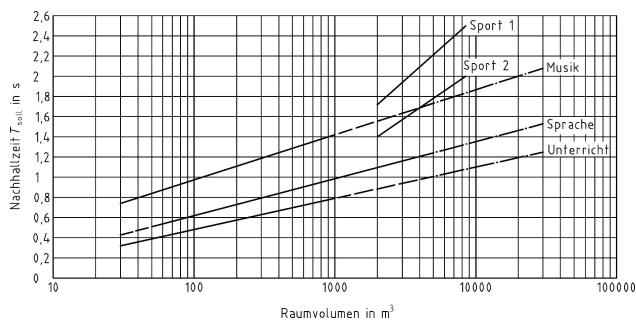
A. Odmevni čas

Odmevni čas T je čas, ki je potreben, da raven zvočnega tlaka v prostoru po izklopu zvočnega vira pade za 60 dB. Vrednost odmevnega časa se v območju pod

Schröderjevo frekvenco med različnimi točkami v prostoru močno spreminja, tako da praviloma kot odmevni čas razumemo njegovo prostorsko povprečje. Odmevni čas je povezan s subjektivno zaznavo **odmevnosti** prostora.

V luči Sabinove enačbe za odmevni čas, ta podaja razmerje med volumnom in absorpcijsko površino prostora. Tako ob večanju velikosti prostora in brez spreminjanja absorpcijskih lastnosti mejnih površin odmevni čas raste. Zato smo vajeni, da imajo večji prostori daljše odmevne čase.

Odmevni čas je tudi osrednji akustični parameter prostora, ki ga je že leta 1885 uvedel W. C. Sabine. Danes so izoblikovana priporočila za njegovo vrednost in kot primer podajam graf iz nemškega standarda DIN180154 [8] (glej sliko 1), po katerem ciljno vrednost odmevnega časa določimo glede na velikost in namembnost prostora¹.



Slika 1: Priporočene vrednosti odmevnega časa glede na namembnost prostora po standardu DIN180154 [8]. Na abscisi je volumen prostora, na ordinati pa vrednost odmevnega časa. Daljice povezujejo priporočeno vrednost in volumen za različne namembnosti: Sport (šport), Musik (glasba), Sprache (govor) in Unterricht (pouk).

II. Metoda prekinjenega šuma

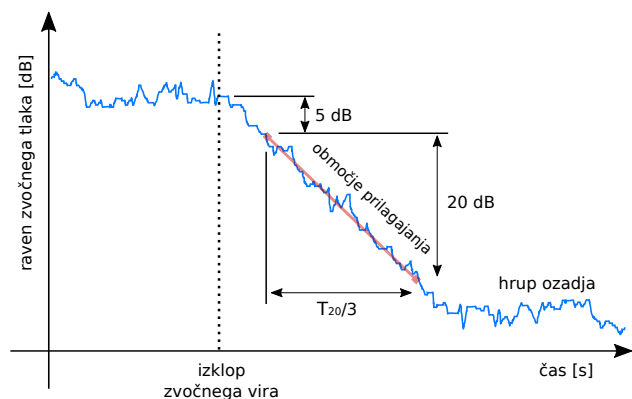
Kot navaja meritveni standard ISO3382 [4], lahko meritev odmevnega časa opravimo na podlagi dveh merilnih metod. **Metoda prekinjenega šuma** direktno sledi njegovi definiciji in je zato prikladna za njegovo

¹ Poleg same vrednosti odmevnega časa je pomembna tudi njegova frekvenčna odvisnost, ki se ravno tako spreminja z namembnostjo prostora.

ponazoritev. **Metoda integriranega impulznega odziva** pa odpravlja statistično odstopanje izmerkov, a zahteva obsežnejšo obdelavo signalov.

Izpostavljam, da obe merilni metodi sledita padanju ravni zvočnega tlaka, torej bi po definiciji odmevnega časa morali zajemati dinamično območje 60 dB. Običajno pa zajemamo manjše dinamične razpone 30, 20 in 10 dB, s čimer dobimo T_{20} , T_{30} in EDT (zgodnji čas padanja - ang. *early decay time*). Kljub obravnavi manjšega dinamičnega razpona, pa so vse količine podaljšane na čas, ki bi ga dobili ob opazovanju 60 dB območja.

Metoda prekinjenega šuma (ang. *interrupted noise method*) temelji na predvajanju šuma, ki ga prekinjamo. Pri tem merimo raven zvočnega tlaka, in sicer v frekvenčnih pasovih, če nas zanima frekvenčno odvisno obnašanje odmevnega časa. Ko se v prostoru vzpostavi stacionarna raven zvočnega tlaka, vir prekinemo, nato pa spremljamo padanje ravni, kot je shematsko prikazano na sliki 2. Iz te je razvidno, kako npr. določimo T_{20} kot tri-kratnik časa, v katerem pade glasnost za 20 dB (z -5 dB na -25 dB) glede na referenčno raven 0 dB, ki je vzpostavljena ob dlje trajajočem delovanju zvočnega vira.



Slika 2: Shematski prikaz principa merjenja odmevnega časa T_{20} z metodo prekinjenega šuma. Graf prikazuje izmerjeno raven zvočnega tlaka ob izklopu zvočnega vira in območje linearnega prilagajanja, s katerim določimo vrednost parametra T_{20} .

Predvajan signal pri merjenju z metodo prekinjenega šuma je najpogosteje naključni šum roza spektra. Ta namreč zagotavlja enakomerne zvočne ravni v vseh frekvenčnih pasovih, kar je pomembno za doseganje ugodnega razmerja med signalom in šumom. V praksi odmevni čas tudi opazujemo v posameznem frekvenčnem pasu, saj je praviloma frekvenčno odvisen.

III. Metoda integriranega impulznega odziva

Metodo integriranega impulznega odziva je leta 1965 predstavil nemški akustik Schröder [9], ki je izpostavil težave merilne metode prekinjenega šuma. Pri tej je namreč padanje ravni zvočnega tlaka zaradi uporabe naključnega signala odvisno od faze, s katero je vzbujen posamezni tlačni način v prostoru. Zato moramo meritev

ponavljati in rezultate povprečiti, pri čemer je konvergenca še posebej počasna v območju nizkih frekvenc. Schröder je pri tem pokazal, da povprečenje vodi k odmevnemu času, ki ga dobimo z metodo integriranega impulznega odziva.

V smislu meritve moramo torej izmeriti impulzni odziv, z obdelavo katerega nato določimo odmevni čas.

A. Meritev odziva

Ustaljen postopek merjenja akustičnega odziva prostora temelji na spektrih korelacije [10, 11] predvajanega $x(t)$ in zajetega signala $y(t)$. Kot $x(t)$ preko zvočniškega sistema predvajamo poljuben signal, ki pa mora imeti zadostno energijo v celotnem frekvenčnem območju merjenja, v katerem se mora vzpostaviti zadostno razmerje med signalom in šumom oz. hrupom ozadja. Med predvajanjem zvočnega signala merimo zvočni tlak $y(t)$ z mikrofonom.

$y(t)$ je konvolucija predvajanega signala z impulznim odzivom prostora

$$y(t) = x(t) * h(t). \quad (1)$$

Konvolucijo v enačbi (1) v frekvenčnem prostoru nadomestimo z množenjem

$$Y(f) = X(f) \cdot H(f), \quad (2)$$

kjer so $Y(f)$, $X(f)$ in $H(f)$ Fourierove transformirane signalov $y(t)$, $x(t)$ in $h(t)$. $H(f)$ je torej frekvenčni odziv prostora, ki bi ga lahko dobili na osnovi enačbe (2) kot

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)}. \quad (3)$$

To postopanje pa ni ustrezno, ko želimo meritev ponoviti, zajete signale povprečiti in s tem izboljšati razmerje med signalom in šumom. V praksi tako frekvenčni odziv izračunamo kot [11]

$$H(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)}, \quad (4)$$

kjer je $S_{xy}(f)$ spekter korelacije signalov $x(t)$ in $y(t)$ (ang. *cross correlation spectral density*), $S_{xx}(f)$ pa spekter avtokorelacije predvajanega signala $x(t)$. Ob večkratnem zajemu signala $y(t)$ s povprečenjem spektra korelacije signalov $S_{xy}(f)$ torej izboljšamo razmerje signal/šum meritve.

Kot kontrolo kvalitete dobljenih rezultatov ob vsaki ponovitvi meritve izračunamo tudi koherenco [11]

$$C(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)}, \quad (5)$$

ki je pokazatelj nelinearnosti sistema ali prisotnosti šuma. Tako med meritvijo praviloma spremljamo, ali je vrednost koherence ves čas zadovoljivo blizu 1.

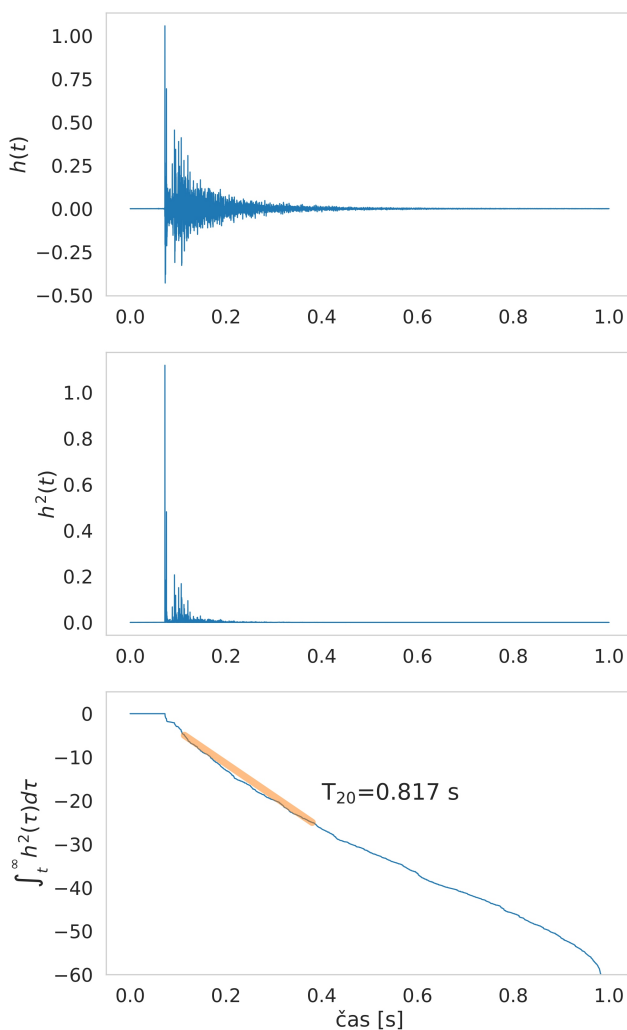
B. Določitev odmevnega časa

Shematski prikaz določanja odmevnega časa z metodo integriranega impulznega odziva je na sliki 3. Izmerjen impulzni odziv prostora $h(t)$ v prvem koraku filtriramo po frekvenčnih pasovih, če želimo opazovati frekvenčno

odvisnost odmevnega časa. Filtriran signal $h'(t)$ v naslednjem koraku kvadriramo, od koder dobimo **krivuljo padanja ravni zvočnega tlaka**² z integracijo

$$\int_t^{\infty} h'^2(\tau) d\tau. \quad (6)$$

V zadnjem koraku na izbranem dinamičnem območju krivulje padanja ravni zvočnega tlaka izvedemo prilaganje linearne funkcije, iz koeficienta katere razberemo odmevni čas.



Slika 3: Določanje odmevnega časa po metodi integriranega impulznega odziva. Gornji graf prikazuje izmerjen impulzni odziv, srednji graf njegov kvadrat, spodnji graf pa krivuljo padanja ravni zvočnega tlaka. Na slednjem je z odebeljeno črto označeno optimalno linearno prilaganje (med -5 dB in -25 dB), na podlagi katerega določimo odmevni čas T_{20} . Za potrebe prikaza je uporabljen impulzni odziv, izmerjen v dvorani Kulturnega doma Bukovica decembra 2016.

IV. Zaključki

Odmevni čas je temeljni parameter prostora, na podlagi katerega praviloma določimo projektne/ciljne akustične lastnosti prostora. Odmevni čas tudi računsko ali modelsko napovemo in je torej vodilo pri izbiri materialov

²V strokovni literaturi je krivulja padanja ravni zvočnega tlaka imenovana Schröderjeva krivulja padanja (ang. *Schröder decay curve*).

in obodnih površin prostora. Kot sem predstavil, lahko odmevni čas tudi merimo, tako da z njim spremljamo uspešnost akustičnega projektiranja oz. izvedbe.

Predstavil sem dve temeljni metodi merjenja odmevnega časa - metodo prekinjenega šuma in metodo integriranega impulznega odziva. Za obe metodi sem predstavil zahtevano obdelavo signalov in shematsko prikazal potek določitve odmevnega časa. Pri tem sem povzel nekatere pomembne razlike med obema metodama.

Literatura

- [1] R. Prislán and D. Svenšek, "Room mode shape visualization using a multi-microphone measurement technique," in *Proceedings of the 7th AAAA Congress on Sound and Vibration*, 2016.
- [2] ISO 1996-2:2017, *Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 2: Determination of sound pressure levels*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2017.
- [3] ISO 9614-1, *Acoustics – Determination of Sound Power Levels of Noise Sources Using Sound Intensity—Part 1: Measurement at Discrete Points*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1993.
- [4] International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, "ISO 3382-1:2003 - Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces," 2003.
- [5] R. Prislán and D. Fefer, "Principi lokalizacije zvočnih izvorov," in *Zbornik šestindvajsete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2012*, 2012.
- [6] R. Prislán and D. Svenšek, "Room mode shape visualization using a multi-microphone measurement technique," in *Proceedings of the 7th AAAA Congress on Sound and Vibration*, 2016, pp. 125–130.
- [7] —, "Kako z meritvijo prepoznati modalne oblike v prostoru?" in *Zbornik šestindvajsete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2017*, 2017, pp. 146–150.
- [8] DIN 180154:2004, *Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen*. DIN Deutsches Institut für Normung, 2008.
- [9] M. R. Schroeder, "New method of measuring reverberation time," *J. Acoust. Soc. Am*, vol. 37, pp. 409–412, 1965.
- [10] C. Sujatha, *Vibration And Acoustics*. McGraw-Hill Education (India), 2010.
- [11] F. Jacobsen, *An Elementary Introduction to Applied Signal Analysis - note number 7001*. Technical University of Denmark, Acoustic Technology, Department of Electrical Engineering, 2010.