

Optimizacija prostorne rezolucije mikrofonskog niza za merenje saobraćajne buke

Miodrag Stanojević, Miloš Bjelić, Tatjana Miljković

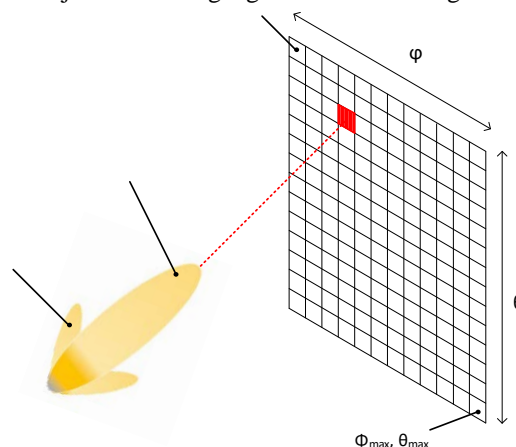
Apstrakt — Merenje saobraćajne buke mikrofonskim nizom omogućava određivanje ugaone raspodele incidentne energije buke na fasadi zgrada. Jedan od osnovnih parametara koji se zadaje u ovakvom merenju jeste ugaona rezolucija kojom se vrši odabiranje u prostornom domenu. S obzirom na računsku kompleksnost algoritma za prostorno-vremensku obradu signala mikrofonskog niza, optimizacija minimalne potrebne prostorne rezolucije omogućava značajno skraćivanje procesa izračunavanja. Merenja prikazana u ovom radu vršena su na četiri lokacije u urbanoj sredini. Lokacije se razlikuju u broju saobraćajnih traka, tipu saobraćaja, udaljenosti objekata, itd. Pretpostavka koja se istražuje u ovom radu jeste da je minimalna potrebna rezolucija mikrofonskog niza različita za svaku od ovih lokacija, i da je dominantno određena morfologijom urbane lokacije. Merenja su vršena mikrofonskim nizom koji čine 24 omnidirekciona mikrofona. Geometrija mikrofonskog niza je optimizovana za merenje saobraćajne buke.

Ključne reči — mikrofonski niz, rezolucija, saobraćajna buka

I. UVOD

Merenje izvora zvuka mikrofonskim nizom omogućava eksperimentalno utvrđivanje ugaone raspodele incidentne energije [1]. Prilikom tumačenja rezultata ovakvih merenja neophodno je uzeti u obzir fizička ograničenja mikrofonskog niza, odnosno *beam pattern* koga karakterišu dva ključna parametra: širina glavnog loba i potisnutost bočnih lobova. Ova dva parametra su frekvencijski zavisna i određena prvenstveno rasporedom mikrofona, odnosno geometrije mikrofonskog niza. Mikrofonski niz koji je korišćen za merenja prikazana u ovom radu je dvodimenzionalni niz sa 24 omnidirekciona mikrofona čija je geometrija optimizovana za frekvencijski opseg u kom se nalazi saobraćajna buka [2]. Algoritam za eksperimentalno određivanje ugaone raspodele incidentne energije polazi od određivanja doprinosa zvučne energije iz pojedinačnih tačaka zamišljene ekvidistantne mreže tačaka na koju je podeljen prostor ispred mikrofonskog niza. Određivanje doprinosa energije podrazumeva virtuelno usmeravanje glavnog loba mikrofonskog niza i pomeranje od tačke do tačke i merenje energije izlaznog signala. Virtuelno usmeravanje mikrofonskog niza (*beamsteering*) vrši se

nakon usnimavanja 24-kanalnog signala mikrofonskog niza.



Sl. 1. Usmeravanje mikrofonskog niza – *beamsteering*. Zamišljeni grid tačaka skeniranja određenih azimutom (φ) i elevacijom (θ).

Imajući u vidu navedene nesavršenosti mikrofonskog niza (konačna širina glavnog loba i postojanje bočnih lobova koji nisu zanemarljivi), dobija se mapa prostorne raspodele energije koja predstavlja konvoluciju stvarne raspodele izvora zvuka i odziva mikrofonskog niza, stoga se ovakav rezultat naziva „prljava mapa“. Ova mapa služi kao osnov za dalju obradu koja podrazumeva set dekonvolucionih procedura koje imaju za cilj da dobijeni rezultat očiste od uticaja mikrofonskog niza. Dekonvolucionni algoritam koji se koristi u ovom istraživanju je DAMAS2 [3,4,5]. Nakon toga se moguće je odrediti gustinu verovatnoće energije po prostornim uglovima u odnosu na liniju upravnu na ravan fasade, koja služi za proračun izolacione moći pregrade.

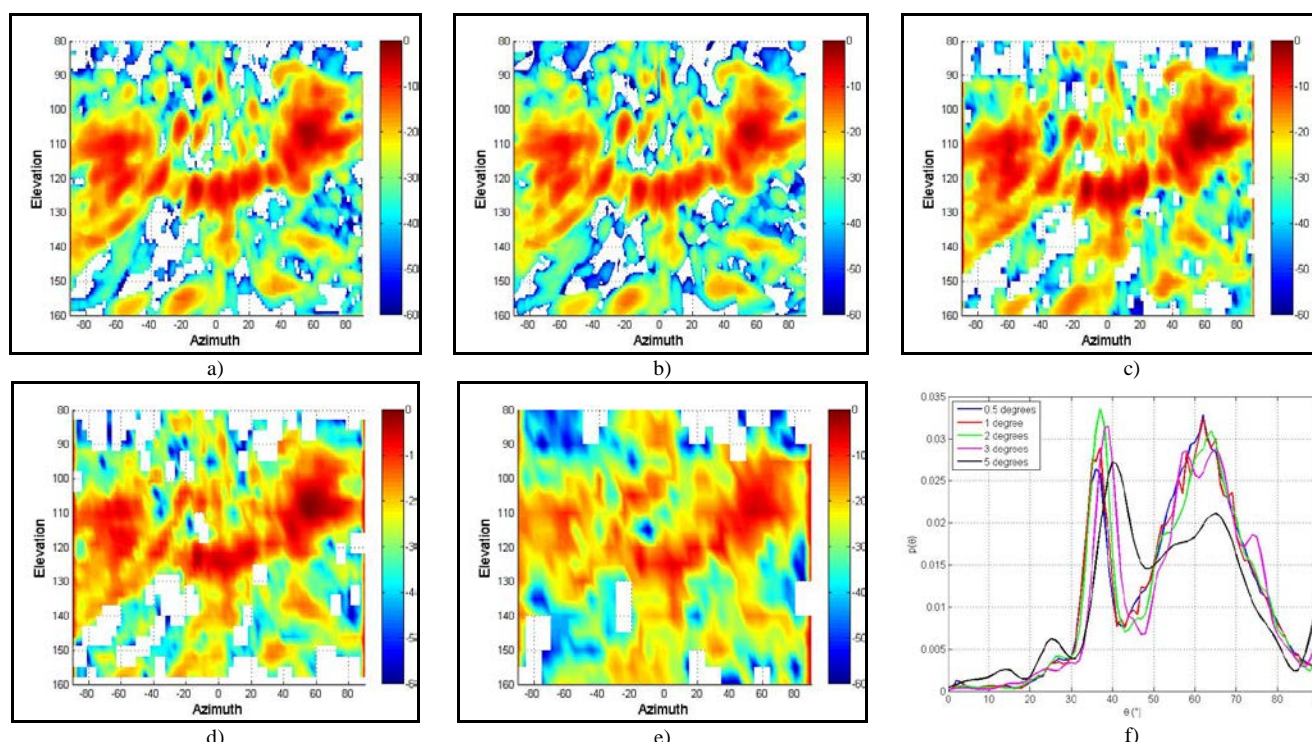
Vremenski najzahtevniji postupak u opisanoj proceduri jeste dobijanje „prljave mape“. Razlog za to je iterativni postupak izračunavanja energetskih doprinosa koji podrazumeva izračunavanje za svaki par azimut-elevacija. S obzirom da je kompleksnost ovog procesa $O(n^2)$, smanjivanje rezolucije odabiranja donosi velike uštede u vremenu potrebnom za izračunavanje.

Pretpostavka koja se istražuje u ovom radu je da minimalna potrebna rezolucija zavisi od karakteristika urbane lokacije na kojoj se vrši merenje: da li je kanjon ulica, udaljenost saobraćajnih traka od fasade objekta (tzv. udaljenost ravni skeniranja r), postojanje raskrsnica i sl. Pretpostavlja se da će dominantan uzrok razlike u minimalnoj potrebnoj rezoluciji na različitim lokacijama biti različita udaljenost ravni skeniranja od fasade objekta na kojoj je postavljen mikrofonski niz. Međutim, istražena je eventualna zavisnost minimalne potrebne rezolucije od drugih parametara lokacije.

Miodrag Stanojević – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: miodragstanojevic@bitprojekt.co.rs).

Miloš Bjelić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: bjelic@etf.rs).

Tatjana Miljković – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: tm@etf.rs).



Sl. 2. Raspodela incidentne energije po azimutu i elevaciji za događaj prolaska automobila za različite ugaone rezolucije (pomeraje po azimutu i elevaciji): a) $\Delta\phi=\Delta\theta=0.5^\circ$, b) $\Delta\phi=\Delta\theta=1^\circ$, c) $\Delta\phi=\Delta\theta=2^\circ$, d) $\Delta\phi=\Delta\theta=3^\circ$ i e) $\Delta\phi=\Delta\theta=5^\circ$. Funkcija gustine verovatnoće incidentne energije za različite ugaone rezolucije.

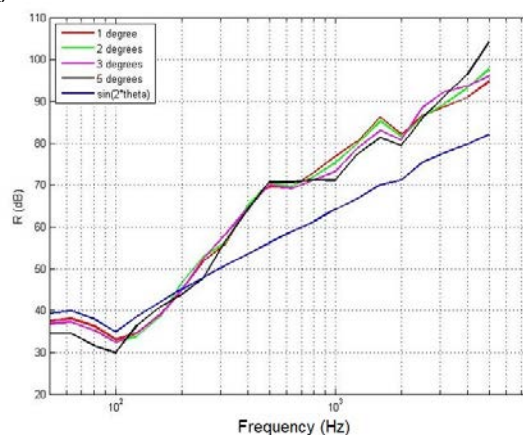
Cilj istraživanja jeste dobijanje formule za određivanje minimalne potrebne rezolucije kojom se ulazi u proračun za datu lokaciju, kako bi se postigla maksimalna efikasnost algoritma i skratilo vreme izračunavanja.

II. METODE

Na slici 2 prikazana je raspodela energije po azimutu i elevaciji za jedan prolazak automobila ispred fasade objekta, za različite vrednosti prostorne rezolucije odabiranja. Na slici f) prikazana je gustina verovatnoće incidentne energije po prostornim uglovima u odnosu na normalu na površinu fasade. Funkcija gustine verovatnoće prikazana je za jedan frekventijski bin širine 1 Hz opseg oko centralne frekvencije 1000 Hz. Iz oba prikaza se može zaključiti da smanjivanje rezolucije do $\Delta\phi=\Delta\theta=3^\circ$ ne unosi značajnu grešku u određivanju funkcije gustine verovatnoće incidentne energije. Kako bi se sagledao uticaj na krajnji rezultat, neophodno je izvršiti analizu nad svim frekventijskim binovima, odnosno proračunati prediktovanu vrednost izolacione moći fasadne pregrade koja je izložena buci sa ovakvom raspodelom [6].

Na slici 3 prikazana je proračunata prediktovana vrednost izolacione moći fasadne pregrade od betona debljine 20 cm. (Parametri pregrade $d=0.20\text{ m}$, $m_{sp}=2500\text{ kg/m}^3$, $c_l=3500\text{ m/s}$, $\eta_i=0.006$). Prikazane su frekventijski zavisne vrednosti izolacione moći za rezolucije 1,2,3 i 5 stepeni, kao i teoretska vrednost proračunata za oblik raspodele incidentne energije $\sin^2(2\theta)$. Na slici se može uočiti da su proračunate vrednosti u određenim frekventijskim opsezima i do 8 dB za različite vrednosti ugaone rezolucije. Međutim, kada se posmatraju jednobrojne vrednosti izolacione moći (Tabela 1), uočava se da je razlika između različitih rezolucija sa kojima se ulazi u proračun zanemarljiva. U svim slučajevima izolaciona moć proračunata na osnovu realnih raspodela energije podmašuje teoretsku vrednost u

frekventijskom opsegu oko frekvencije koincidencije, a premašuje u opsegu iznad oko 300 Hz. Jednobrojne vrednosti izolacione moći proračunate na osnovu realnih raspodela energije premašuju teoretsku vrednost u svim slučajevima.



Sl. 3. Izolaciona moć fasadne pregrade za različite vrednosti ugaone rezolucije. Struktura pregrade – beton 20 cm.

$\Delta\phi=\Delta\theta$	R'_{-w} (dB)
1°	60
2°	60
3°	59
5°	59
$p(\theta)=\sin^2(2\theta)$	58

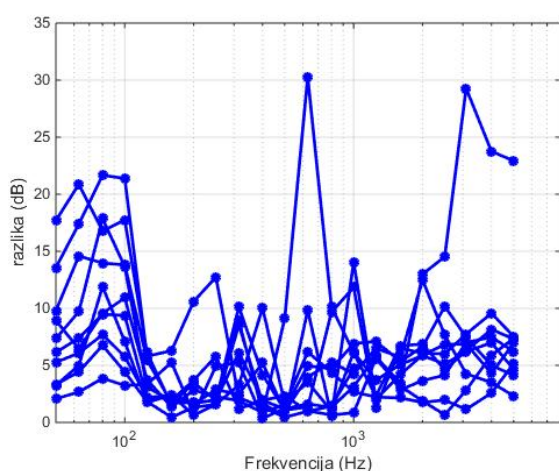
Tabela 1. Jednobrojne vrednosti izolacione moći fasadne pregrade za različite vrednosti ugaone rezolucije. Struktura pregrade – beton 20 cm.

Prikazano poređenje izvršeno je na bazi jednog događaja na jednoj lokaciji u gradskoj sredini. Kako bi se izveli generalni zaključci analiza je proširena na veći broj lokacija, događaja i tipova događaja.

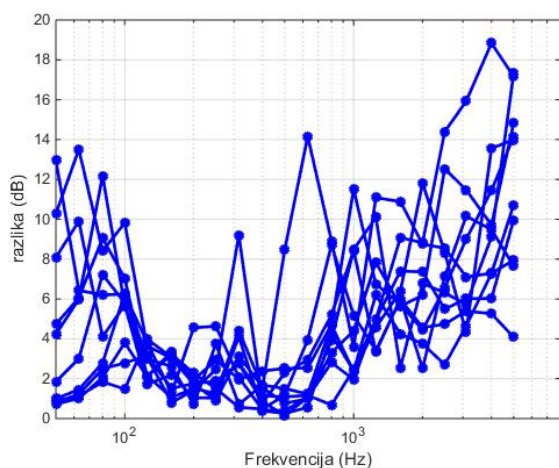
U prethodnim istraživanjima pokazano je da se prostorna raspodela energije na lokaciji može utvrditi analizom ključnih događaja, te da je globalna raspodela energije na lokaciji funkcija raspodela pojedinačnih događaja [7]. Stoga je analiza prikazana u ovom radu sprovedena nad setom od 10 ključnih događaja za četiri različite lokacije u gradskoj sredini. Pet događaja koji su predstavljaju pomeranje dominantnog zvučnog izvora na lokaciji (saobraćaj – automobili, trojelbusi autobusi) i pet događaja koji predstavljaju ambijentalni fon prisutan na lokaciji bez dominantnih izvora zvuka koji se izdvajaju po energiji.

III. REZULTATI

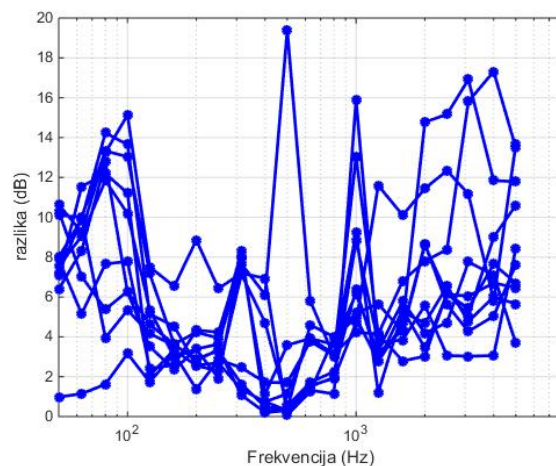
Na slici 4 je prikazana razlika između maksimalne i minimalne dobijene vrednosti izolacione moći po frekvencijama za 10 događaja na lokaciji Bulevar Kralja Aleksandra.



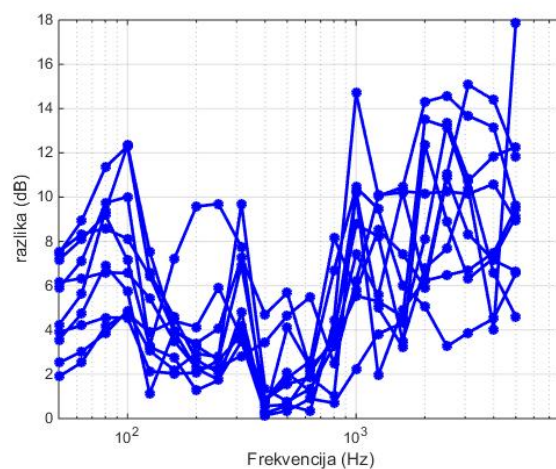
Sl. 4. Varijabilnost proračunate vrednosti izolacione moći za različite prostorne rezolucije. Lokacija – Bulevar Kralja Aleksandra



Sl. 5. Varijabilnost proračunate vrednosti izolacione moći za različite prostorne rezolucije. Lokacija – Cara Nikolaja II



Sl. 6. Varijabilnost proračunate vrednosti izolacione moći za različite prostorne rezolucije. Lokacija – Ilije Garašanina



Sl. 7. Varijabilnost proračunate vrednosti izolacione moći za različite prostorne rezolucije. Lokacija – Molerova

IV. DISKUSIJA

ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan u okviru projekta TR 36026 koga finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] M. Stanojević, M. Bjelić, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, Measurements of noise energy angular distribution at the building envelope using microphone arrays, *Applied Acoustics*, Vol 140, 283-287 (2018).
- [2] M. Bjelić, M. Stanojević, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, „Microphone array geometry optimization for traffic noise analysis“, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol 141(5), 3101-3104 (2017).
- [3] T.F. Brooks, W.M. Humphreys, „A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays“, *Journal of Sound and Vibration* 294.4, 856-879, 2006.
- [4] R.P. Dougherty, „Extensions of DAMAS and Benefits and Limitations of Deconvolution in Beamforming“, *AIAA*, 2961.11, 2005.
- [5] K. Ehrenfried, L. Koop, „A comparison of iterative deconvolution algorithms for the mapping of acoustic sources“, *AIAA journal*, 45.7:1584-1595, 2007.
- [6] H. Kurtović, „Priručnik za proračun zvučne izolacije“. Beograd: Elektrotehnički fakultet, Laboratorija za akustiku, 1994.
- [7] Miloš Bjelić, Miodrag Stanojević, Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić, Tatjana Miljković, Određivanje ostvarene vrednosti izolacione moći fasadnih pregrada na bazi izdvojenih karakterističnih

dogadaja, Zbornik radova 64. Konferencije ETRAN, Beograd, Septembar 2020, str. AK2.2.1-AK1.2.6, ISBN: 978-86-7466-852-8.

- [8]
- [9] C.Brutel-Vuilmet, C.Guigou-Carter, M.Villot, „A Study of the Influence of Incidence Angle on Sound Reduction Index Using NAH-Phonoscopy. Acta Acustica United with Acustica, 2007;Vol. 93: 364–374.
- [10] D. Šumarac Pavlović, F. Pantelić, S. Bojčić, M. Bjelić, „Airborne sound insulation of monolithic partition as a function of incidence angles“, Proc. Forum Acusticum, Krakow 2014.
- [11] G.Vermeir, G.Geentjens, W.Bruyninckx, „Measurement and calculation experiences on façade sound insulation“, Proc INTER-NOISE 2004.
- [12] ISO 140-5 „Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 5: Field measurements of airborne sound insulation of façade elements and façades“.
- [13] M. Bjelić, M. Stanojević, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, „Određivanje uglova incidencije buke u urbanim sredinama“, ETRAN, Kladovo, jun 2017, Broj rada (zbornik radova CD): AK 1.1, ISBN: 978-86-7466-692-0.
- [14] M. Bjelić, „Analiza ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke primenom mikrofonskog niza“, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Doktorska disertacija, jun 2018.
- [15] M. Bjelić, M. Stanojević, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, T. Miljković, „Analiza ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke u urbanim uslovima“, ETRAN, Palić, jun 2018, Zbornik radova 49-54, ISBN: 978-86-7466-752-1.
- [16] M. Bjelić, „Analiza ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke na fasadama zgrada u urbanim uslovima pomoću mikrofonskog niza“, 26th Telecommunications forum TELFOR 2018, Belgrade, November 2018, CD Proceedings paper No. 8.9., ISBN: 978-1-5386-7170-2.
- [17] ISO 717-1:1996 „Acoustics – rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation“.
- [18] C. Buratti, E. Belloni, E. Moretti, “Façade noise abatement prediction: New spectrum adaptation terms measured in field in different road and railway traffic conditions“, Appl. Acoust. 2014;76:238–248.
- [19] J. Hald and J. Christensen, „A novel beamformer array design for noise source location from intermediate measurement distances“, J. Acoust. Soc.Am. 112, 2448, DOI: 10.1121/1.4780077. (2002).
- [20] M. Bjelić, M. Stanojević, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, „Dizajn mikrofonskog niza optimizovanog za monitoring saobraćajne buke“, ETRAN, Zlatibor, jun 2016, Broj rada (zbornik radova CD): AK 1.2, ISBN: 978-86-7466-618-0.
- [21] U. Michel, “History of acoustic beamforming”, Berlin, 2006. Berlin Beamforming Conference.
- [22] L. Beranek, “Noise Reduction. New York”: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1960.
- [23]

ABSTRACT

Measurements of the traffic noise using microphone arrays enables the determination of angular distribution of the incident energy on a building façade. One of the parameters which are set in such measurements is the spatial resolution. Considering high computational complexity of space-time algorithms for array signal processing, the optimization of required spatial resolution can reduce the computation process significantly. The measurements shown in this paper were performed on four urban locations. The locations differ in the number of traffic lanes, traffic types, distances to the surrounding buildings, etc. This paper examines the assumption that the minimal required resolution of the microphone array is different for each location, and is dominantly determined by the urban location morphology. The measurements were performed with a microphone array comprised of 24 omnidirectional microphones. The geometry of the microphone array is optimized for traffic noise measurements.

Microphone array spatial resolution optimization for traffic noise measurements

Miodrag Stanojević, Miloš Bjelić, Tatjana Miljković