

Određivanje uglova incidencije buke na fasadama u urbanim sredinama

Miloš Bjelić, Miodrag Stanojević, Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić

Apstrakt— Merenje vrednosti izolacione moći fasade vrši se pomoću izvora buke postavljenog pod uglom 45 ± 5 stepeni, prema ISO 140-5. Zbog zavisnosti vrednosti izolacione moći fasade od ugla pod kojim zvučni talas pogađa fasadu, od interesa je ispitati raspodelu uglova incidencije buke na fasadu u realnosti. U ovom radu prikazan je način za određivanja i analizu incidentnih uglova buke na fasadi zgrada u urbanim uslovima. Kao alat za ovu svrhu korišćen je planarni neregularni mikrofonski niz sa 24 mikrofona, koji je dizajniran namenski za ovu aplikaciju. Lokalizacija zvučnih izvora u urbanim uslovima i raspodela uglova incidencije izvršena je pomoću nekoliko algoritama za obradu signala sa mikrofonskog niza.

Ključne reči— raspodela uglova incidencije, mikrofonski niz, optimizacija pozicija, zvučna izolacija, lokalizacija.

I. UVOD

Osnovna teorija u zvučnoj izolaciji u zgradama ustanovljena je na pretpostavci da postoje prostorije sa obe strane pregrade. Takođe, pretpostavka je i da je zvučno polje u predajnoj prostoriji blisko homogenom i difuznom polju, što za posledicu ima uniformnost zvučne energije koja pogađa pregradu. Matematički modeli za transmisiju zvuka kroz pregradu izvedeni su za pretpostavku difuznog polja u predajnoj prostoriji. Uslovi za difuzno polje ispunjeni su u laboratoriskim uslovima gde se meri vrednost zvučne izolacije materijala. Uniformna raspodela uglova incidencije je polazna pretpostavka u gotovo svakom radu u kome se izračunava izolaciona moć pregrade.

Fasadna pregrada u oblasti zvučne izolacije predstavlja granicu između sobe u zgradi sa jedne strane, i spoljašnjeg prostora u kom postoje izvori buke. Prostorni ugao u kom se mogu naći izvori buke je 180° u difuznom polju. Međutim, u realnosti ovaj prostorni ugao je manji jer ne postoje izvori buke u celom opsegu. Raspodela uglova incidencije spoljašnje buke na fasadi zavisi od konfiguracije terena u kom se analizirana zgrada nalazi. Konfiguraciju terena određuje širina ulice, broj saobraćajnih traka, prisutnost naspramnih zgrada, visina zgrada i sl. Na osnovu toga može se zaključiti da su uslovi za nastanak difuznog polja na fasadi malo verovatni, što se ne poklapa sa laboratoriskim

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

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

Dragana Šumarac Pavlović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: dsumarac@etf.rs).

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

uslovima u kojima se nalazi fasadna pregrada.

Zavisnost vrednosti izolacione moći pregrade od raspodele incidentne energije $R(\theta)$, obrađena je u literaturi [1-2]. Pokazano je da je vrednost zvučne izolacije zavisna od frekvencije i incidentnih uglova. Ova činjenica važna je za vrednost izolacione moći u realnim uslovima, u kojima varijacija uglova incidencije spoljašnje buke može proizvesti različite vrednosti buke unutar zgrade. U literaturi [3] vršena su merenja zvučne izolacije fasada korišćenjem standardizovanih tehnika merenja pomoću zvučnika i pomoću saobraćaja, i pokazano je da vrednosti $D_{2m,rT}$ mogu varirati i do 8dB. Sigurno je da ove varijacije potiču od razlike između incidentnih uglova saobraćajne buke i incidentnog ugla 45 ± 5 , kada se koristi tehnika merenja sa zvučnikom [4].

Vrednost izolacione moći fasade zavisi od ugaone raspodele incidentne spoljašnje buke, međutim ta raspodela u opštem slučaju nije poznata. Mikrofonski niz predstavlja moderan alat u akustičkim merenjima, koji se u kombinaciji sa video kamerom popularno nazvan akustička kamera. Akustička kamera omogućava vizualizaciju i kvantifikaciju zvučnih izvora, odnosno omogućava određivanje pravca nailaska zvuka. Pretpostavka je da se mikrofonski niz, sa odgovarajućim algoritmima za obradu signala sa mikrofonskog niza, može koristiti za određivanje raspodele incidentne zvučne energije na fasadi. U ovom radu ispituje se ova pretpostavka. U ovom radu prikazana je metodologija određivanja raspodele uglova incidencije korišćenjem planarnog mikrofonskog niza sa 24 mikrofona, posebno dizajniranog za ovu aplikaciju.

Rad je organizovan kako sledi. U drugom poglavlju prikazani su algoritmi za lokalizaciju izvora u prostoru i način određivanja raspodele incidentne energije buke na fasadi. U trećem poglavlju prikazani su rezultati merenja i diskusija dobijenih rezultata. Na kraju, u četvrtom poglavlju, izneti su zaključci.

II. METODE

U ovom poglavlju objašnjene su procedure i metodologija koja je korišćena u radu. Biće prikazane karakteristike saobraćajne buke, kao i mikrofonski niz koji se koristi za merenja, prilagođen za ovu aplikaciju. Nakon toga biće prikazani algoritmi za lokalizaciju zvučnih izvora koji su korišćeni za ovo istraživanje. Na kraju biće objašnjena procedura za dobijanje raspodele uglova incidencije iz rezultatnih mapa dobijenih na osnovu algoritama za lokalizaciju.

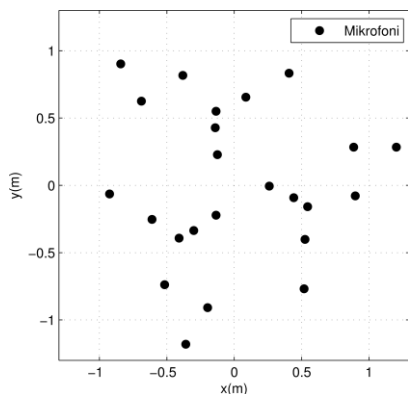
A. Saobraćajna buka

Mikrofonski niz koji se koristi u ovom radu treba da lokalizuje zvučne izvore u saobraćaju i zbog toga je važno sagledati karakteristike saobraćajne buke. Jedna od

najvažnijih karakteristika je frekvencijski opseg u kome se nalazi najveći deo zvučne energije. Saobraćajna buka potiče od više različitih izvora pa je frekvencijski opseg relativno širok. Referentni spektar saobraćajne buke u urbanim uslovima, prikazan je u standardu ISO 717-7 [5]. Pored referentnog spektra u literaturi se mogu pronaći i spektri dobijeni merenjem u urbanim uslovima, na raskrscima, kružnim tokovima i sl [6]. Spektar buke dobijen merenjem se dobro poklapa sa referentnim spektrom, s tim što je opadanje zvučne energije ka niskim, odnosno visokim frekvencijama veće. Poređenjem referentnog spektra i spektra dobijenog merenjem može se zaključiti da oba spektra imaju maksimum oko 1000 Hz i da opadaju iznad i ispod ove frekvencije. Na osnovu toga odabran je frekvencijski opseg od 200 Hz do 2000 Hz za koji će biti optimizovan mikrofonski niz. Frekvencije više od 2 kHz nisu razmatrane zbog toga što se lokalizacija izvora koristi za sagledavanje uticaja buke na zvučnu izolaciju fasade, a uticaj na izolaciju na ovim frekvencijama je zanemarljiv.

B. Mikrofonski niz

Mikrofonski niz se u ovom radu koristiti kao merni alat za određivanje lokacije izvora u prostoru, u odnosu na fasadnu pregradu koja se analizira. Korišćen je planarni mikrofonski niz sa 24 mikrofona, koji se postavlja na fasadu koja se analizira. Karakteristike mikrofonskog niza treba da budu prilagođene aplikaciji za koju se koristi, odnosno izvorima zvuka koji se javljaju pri ovakvom merenju. U prethodnom poglavlju je prikazano da saobraćajna buka dominantno definiše buku koja se javlja u urbanim sredinama, pa mikrofonski niz treba da bude prilagođen ovakvom tipu zvučnih signala. Na osnovu ova dva spektra određen je frekvencijski opseg od interesa za analizu i pozicije mikrofona u mikrofonskom nizu izabrane su tako da se u ovom opsegu dobiju što bolje karakteristike mikrofonskog niza. Najvažnije karakteristike mikrofonskog niza su nivo bočnih lobova i širina glavnog loba u dijagramu usmerenosti mikrofonskog niza. Širina glavnog loba određuje prostornu rezoluciju sa kojom je moguće odrediti pozicije zvučnih izvora, dok nivo bočnih lobova određuje prisustvo lažnih zvučnih izvora u rezultatima lokalizacije [7]. Idealno, vrednost bočnih lobova bi trebala da bude beskonačno mala, a glavni lob bi trebao da ima proizvoljno malu širinu. Ova dva zahteva ne mogu istovremeno da budu zadovoljena pa se u realnosti traži kompromis između njih.



Sl. 1. Raspored mikrofona u mikrofonskom nizu optimizovanom za monitoring saobraćajne buke

U ovom radu koristi se mikrofonski niz čije su pozicije dobijene optimizacionim postupkom. Postupak optimizacije i konstrukcije mikrofonskog niza dat je u [8]. Kao optimizacioni kriterijum korišćen je parametar MSL, koji predstavlja odnos amplitude maksimalnog bočnog loba i glavnog bočnog loba [7]. Na Slici 1 prikazan je raspored mikrofona u prostoru korišćenog mikrofonskog niza.

C. Algoritmi za lokalizaciju

Određivanje raspodele uglova incidencije bazira se na određivanju lokacije pojedinačnih zvučnih izvora pomoću mikrofonskog niza i algoritama za obradu signala sa mikrofonskog niza. U ovom poglavlju biće prikazano nekoliko algoritama za određivanje pravca nailaska zvuka, odnosno lokalizaciju zvučnih izvora u prostoru. Pored osnovnog Konvencionalnog *beamforming*-a (CB) biće prikazani dekonvolucioni algoritmi DAMAS2 i CLEAN-SC.

Konvencionalni *beamforming* (CB)

CB algoritam zasnovan je na određivanju kros-spektralne matrice (CSM) [9]. CSM je kvadratna matrica dimenzije m_0 , gde je m_0 broj mikrofona u mikrofonskom nizu. Član ij kros-spektralne matrice, na frekvenciji f , izračunava se na sledeći način:

$$G_{ij}(f) = P_i^*(f)P_j(f), \quad (1)$$

gde su P_i i P_j spektri signala sa mikrofona i , odnosno j , a $*$ označava konjugovano kompleksnu transformaciju. Elementi CSM matrice predstavljaju unakrsne proizvode spektara svih parova mikrofona, a dijagonala matrice sadrži spektralnu gustinu srednje snage signala na svakom od mikrofona. U praktičnim aplikacijama često se vrši usrednjavanje nad nekoliko susednih vremenskih blokova:

$$G_{ij}(f) = \frac{2}{Kw_s T} \sum_{k=1}^K [P_{ik}^*(f, T)P_{jk}(f, T)], \quad (2)$$

gde je K broj blokova za usrednjavanje, w_s konstantu prozora za usrednjavanje, a T dužinu bloka. Ugaona raspodela zvuka dobija se množenjem CSM matrice sa odgovarajućim *steering* vektorima. U ravni skeniranja definiše se mreža određene gustine, gde je svaka tačka mreže određena azimutom i elevacijom u odnosu na centar niza. Svakoj tački odgovara po jedan *steering* vektor, koji se dobija prema jednačini:

$$e_{p,q} = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_{m_0}]. \quad (3)$$

U (3) p, q označavaju koordinate tačke na mreži skeniranja, dok se komponenta za svaki mikrofonski niz m se izračunava na sledeći način:

$$e_m = \frac{r_m}{r_c} \exp(j2\pi f \tau_m), \quad (4)$$

gde su r_m i r_c rastojanja tačke na mreži skeniranja od mikrofona m i centra niza, respektivno. Količnikom ovih

rastojanja vrši se normalizacija amplitude signala usled različitih propagacionih putanja, dok se članom u eksponentu obezbeđuje fazno pomeranje spektralne komponente signala tako da se vrši konstruktivno sabiranje iz određenog smera. *Steering* vektor, za određeni pravac, kompenzuje propagaciju talasa iz tog pravca do svakog od mikrofona u mikrofonskom nizu. Konačno, ugaona raspodela izvora dobija se na sledeći način:

$$Y(p, q) = \frac{e^{T_{p,q}} G e_{p,q}}{m_0^2}. \quad (5)$$

DAMAS2

Dekonvolucione tehnike imaju za cilj određivanje stvarne raspodele zvučnog polja u prostoru, nezavisno od karakteristika mikrofonskog niza pomoću koga su dobijeni signali. Problem određivanja prostorne raspodele zvučnog polja može se modelovati sledećim izrazom:

$$AX = Y, \quad (6)$$

gde matrica A modeluje karakteristike niza, matrica X predstavlja stvarnu raspodelu izvora, a matrica Y raspodelu dobijenu konvencionalnim *beamformer*-om. Članovi matrice A dobijeni su iz *steering* vektora. Cilj je sa poznatim A i izmerenim Y izračunati X . Originalni DAMAS algoritam [9] rešava problem definisan jednačinom (6) sistemom linearnih jednačina. Rešavanje ovakvog sistema jednačina je vremenski zahtevno, pa su razvijene aproksimacione tehnike pomoću kojih se pojednostavljuje računski i vremenska kompleksnost [10-11].

Modelovanje konvolucije iz izraza (7) može se predstaviti i drugačije. Ako se svaka tačka *grid-a* označi jedinstvenim prostornim vektorom (\vec{x}), tada je odziv u jednoj tački *grid-a*:

$$y(\vec{x}) = \int psf(\vec{x} - \vec{x}')q(\vec{x}')d\vec{x}'. \quad (7)$$

U prethodnom izrazu y predstavlja izmereni odziv u tački određenoj vektorom \vec{x} , q predstavlja snagu izvora u datoj tački *grid-a*, a *psf* je *Point Spread* funkcija. *Point spread* funkcija predstavlja odziv mikrofonskog niza na jediničnu pobudu u nekoj tački i ona je ekvivalentna *beampattern*-u mikrofonskog niza. Redovi matrice A iz izraza (6) su *point spread* funkcije za pretpostavljene izvore u n -toj tački *grid-a*, gde je n broj kolone matrice A . Problem (7) je ekvivalentan problemu (6), jer je i ovde potrebno iz poznate izmerene prostorne raspodele (y) i poznatih karakteristika niza (*psf*) odrediti nepoznatu stvarnu raspodelu izvora (q), za svaku tačku *grid-a*. Algoritam DAMAS2 ovaj problem rešava u domenu prostornih frekvencija. Najpre se (7) prevodi u frekvencijski domen:

$$\tilde{y}(\vec{k}) = \tilde{p}(\vec{k})\tilde{q}(\vec{k}), \quad (8)$$

gde k predstavlja vektor u domenu prostornih frekvencija koji odgovara vektoru \vec{x} , a \tilde{y} , \tilde{p} , \tilde{q} , FFT transformacije odgovarajućih matrica iz (7). Procedura algoritma DAMAS2 može se prikazati na sledeći način:

- Izračunavanje $p(k)$ kao dvodimenzionalne Furijeove transformacije *point spread* funkcije i određivanje polazne mape $y(x)$ CB algoritmom;
- Izračunavanje faktora a koji je suma svih elemenata *point spread* funkcije;
- Postavljanje inicijalne vrednosti $q(x)=0$, za sve tačke *grid-a*;
- Iterativno:
 1. Izračunavanje $q(k)$ kao dvodimenzionalne Furijeove transformacije $q(x)$;
 2. Za svako k , skaliranje $q(k)$ faktorom $\exp(-k^2/(2kc^2))$;
 3. Izračunavanje $r(k)=p(k)q(k)$ za svako k ;
 4. Izračunavanje $r(k)$ kao inverzne dvodimenzionalne Furijeove transformacije $r(k)$;
 5. Izračunavanje novog $q(x)=q(x)+[y(x)-r(x)]/a$ za svako x ;
 6. Postavljanje $q(x)=0$ za sve negativne vrednosti $q(x)$ i povratak na korak 1;

Prikazani iterativni postupak je daleko jednostavniji od DAMAS algoritma i konvergira u znatno manjem broju iteracija. Korak 2 iterativnog postupka predstavlja Gausovo niskopropusno filtriranje i ima za cilj minimizaciju pojave šuma u rezultatu, koji nastaje ukoliko je *grid* skeniranja gušći od maksimalne rezolucije mikrofonskog niza.

CLEAN algoritam

CLEAN algoritmi su preuzeti iz oblasti radio-astronomije. Uticaj *beampattern*-a se uklanja iterativnim postupkom koji je opisan u literaturi [12]. CLEAN-PSF algoritam se bazira na *psf* funkciji i pretpostavkom da zvučno polje kreira određen broj tačkastih nekoherentnih izvora. Postupak započinje od prostorne raspodele dobijene CB algoritmom, ovaj rezultat se naziva „prljava mapa“ i ovaj naziv ukazuje da je dobijena raspodela „zaprpljana“ uticajem *beampattern*-a niza. Iterativna procedura je opisana sledećim koracima:

1. „Prljava mapa“ (Y) dimenzija pxq se analizira i traži pozicija maksimalne vrednosti;
2. Poziciji maksimalne vrednosti se dodeljuje *psf* funkcija, koja opisuje uticaj izvora u ovoj tački na sve ostale tačke *grid-a*;
3. Od „prljave mape“ se oduzima *psf* funkcija dodeljena maksimalnom izvoru iz tačke 2, i dobija nova mapa;
4. Pamti se lokacija maksimalnog izvora i na njeno mesto upisuje „*clean beam*“ koji modeluje tačkasti izvor u toj tački;
5. Sa novom mapom iz tačke 3 se ulazi u novu iteraciju, traži sledeći maksimum.

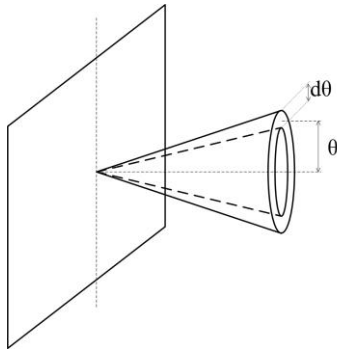
Na kraju iterativnog procesa vrši se sabiranje svih *clean beam*-ova iz tačke 4 i preostala „prljava mapa“ nakon poslednje iteracije.

CLEAN-SC algoritam predstavlja unapređenje CLEAN-PSF algoritma i bazira se na koherentnosti izvora (*spatial coherence*). CLEAN-SC algoritam donosi prednosti u odnosu na PSF u tome što otklanja bočne lobove na taj način što uklanja sadržaje koji su koherentni sa pozicijom izvora koja se utvrđuje iz „prljave mape“.

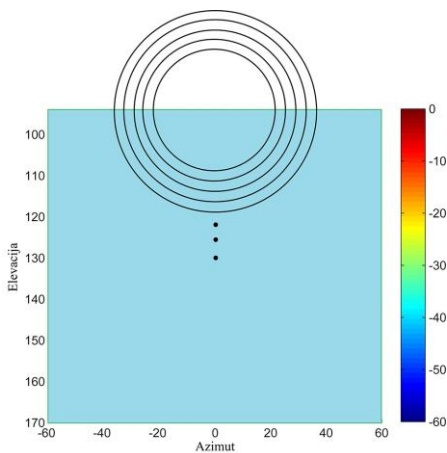
D. Računanje verovatnoće uglova incidencije

Pri određivanju lokacije izvora u prostoru, pomoću opisanih algoritama, dobija se zvučna slika koja je određena sa dva prostorna ugla, azimutom i elevacijom. Raspodelu incidentnih uglova buke na fasadi potrebno je odrediti za uglove u odnosu na normalu, koji ne odgovaraju direktno

vrednostima po azimutu i elevaciji. To znači da je potrebno izvršiti svođenje prostornih uglova azimuta i elevacije na uglove u odnosu na normalu. Način posmatranja prostora u odnosu na normalu usvojen je u standardima koji se tiču merenja i proračuna zvučne izolacije u zgradama. Uglovi se nalaze u opsegu od 0° do 90° , gde ugao od 0° odgovara normalu na fasadu, a ugao 90° ima krak koji je paralelan sa fasadom. Na Slici 2 uprošćeno je prikazan postupak za svođenje prostornih uglova na ugao u odnosu na normalu. Jedan ugao θ određen je kružnim prstenom poluprečnika koji odgovara vrednosti ugla u stepenima i širine $d\theta$. Kao što se vidi sa slike, jednom kružnom prstenu odgovara više uglova po azimutu i elevaciji, pa je potrebno izvršiti sumiranje energije koja odgovara jednom kružnom prstenu. Ta zvučna energija predstavljaće energiju koja je pogodila fasadu pod uglom θ .



Sl. 2. Uglovi incidencije u odnosu na fasadu



Sl. 3. Sumiranje energije na zvučnoj slici nakon lokalizacije

Na Slici 3 prikazana je jedna zvučna mapa dobijena jednim od algoritama za lokalizaciju. Bez gubitka opštosti analizirana je mapa sa jednakim nivoima zvučne energije po svim prostornim uglovima. Crnim kružnicama prikazane su zone u kojima se vrši sumiranje za jedan ugao θ . Centar mikrofonskog niza nalazi se u prostoru koji je određen azimutom 0° i elevacijom 90° . U realnosti od interesa su uglovi po elevaciji od 90° do 180° , jer se ne očekuju zvučni izvori sa velikim nivoom zvučne snage iznad centra mikrofonskog niza. Nakon formiranja suma za sve uglove u odnosu na normalu, potrebno je normalizovati sve vrednosti tako da se ukupna verovatnoća pojave energije po uglovima bude jednaka 1. Na ovaj način dobija se raspodela incidentne energije, odnosno incidentnih uglova u odnosu na fasadu.

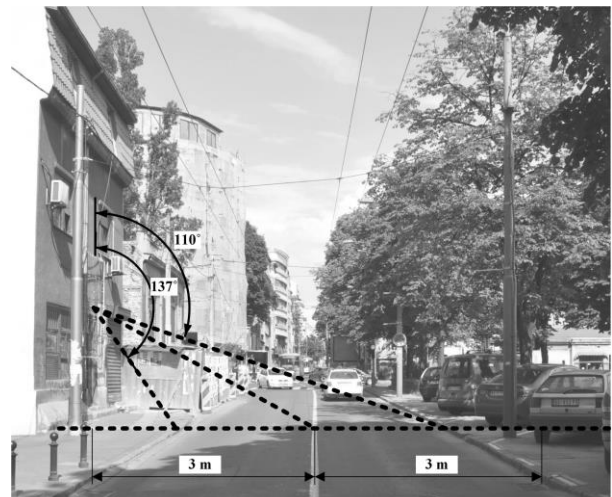
III. REZULTATI MERENJA I DISKUSIJA

U ovom poglavlju biće prikazana postavka merenja u urbanim uslovima, kao i rezultati dobijeni pomoću algoritama za lokalizaciju, opisani u drugom poglavlju. Na Slici 4 prikazan je mikrofonski niz koji je postavljen na fasadu zgrade koja je udaljena 3 metra od ulice sa dve saobraćajne trake. Naspram zgrade nalazi se parking za automobile i park sa zelenilom i nema velikih objekata koji bi izazvali refleksiju zvučnih talasa ka mernom mestu. Centar mikrofonskog niza nalazi se na visini 3 metra u odnosu na nivo ulice i odgovara poziciji prizemlja u zgradi.



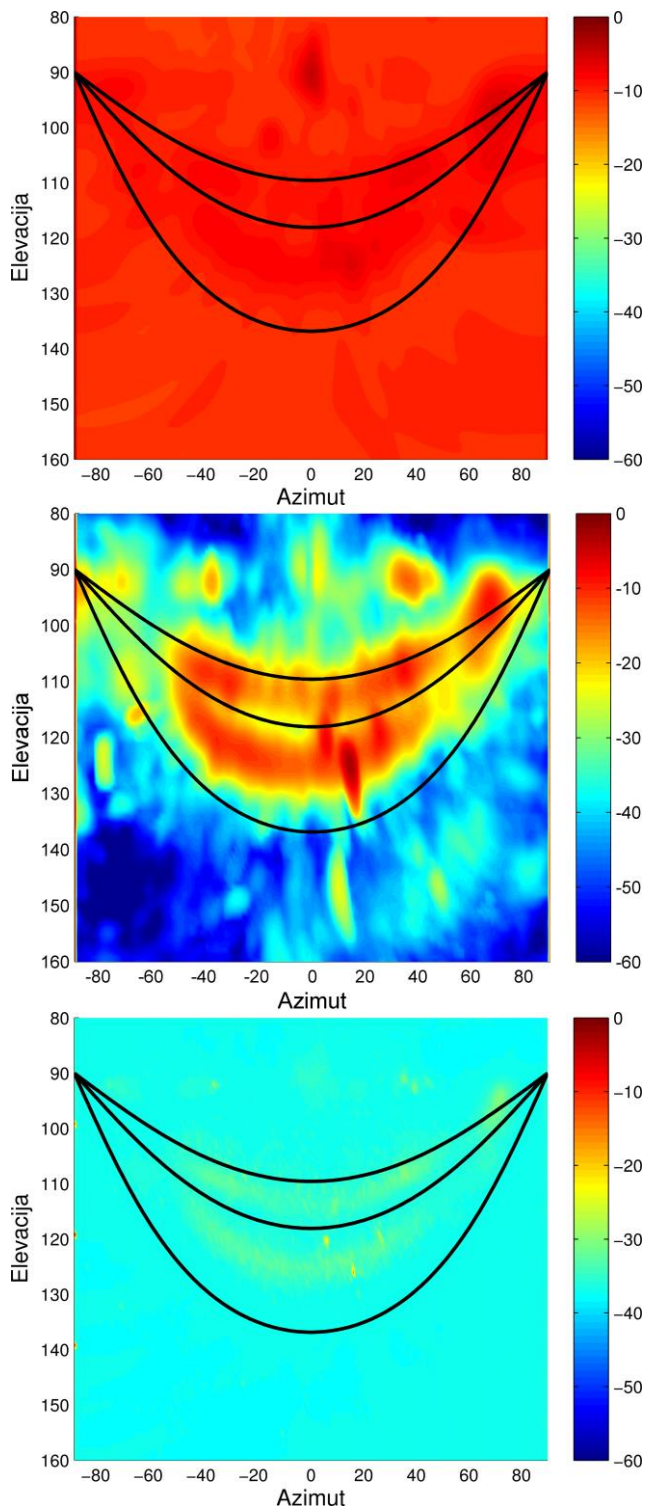
Sl. 4. Pozicija mikrofonskog niza u eksperimentu

Zgrada se nalazi u blizini raskrsnice sa semaforom, pa je zgrada izložena buci od vozila koja se tu zadržavaju. Ulicom u kojoj je vršeno merenje u oba smera prolaze linije javnog gradskog prevoza koje čine autobusi i trolejbusi. Ulicom takođe prolaze automobili, motocikli i kamioni, što ulicu čini prometnom u velikom delu dana. Na Slici 5 prikazan je profil ulice u kojoj je vršeno merenje, sa označenim dimenzijama od interesa za analizu u ovom radu. Saobraćajne trake su široke po 3 metra. Početak ulice se nalazi pod elevacionim uglom od 137° , u odnosu na centar mikrofonskog niza. Kraj druge trake odgovara elevacionom uglu od 110° .



Sl. 5. Profil ulice u kojoj je vršeno merenje

Trajanje merenja je 30 minuta i u tom periodu ulicom je prošao veliki broj vozila svih tipova. Za akviziciju signala sa mikrofonskog niza korišćena je merna oprema opisana u [13].

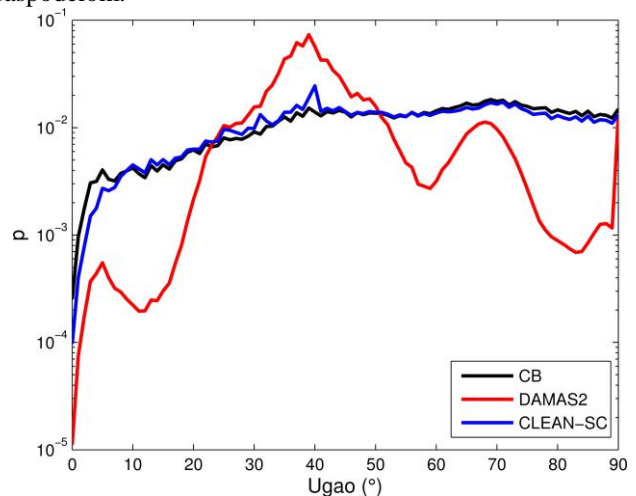


Sl. 6. Rezultat lokalizacije pomoću: a) CB algoritma, b) DAMAS2 algoritma i c) CLEAN-SC algoritma

Na Slici 6 prikazan je rezultat lokalizacije zvučnih izvora u terci 1250 Hz pomoću mikrofonskog niza i tri algoritma koja su korišćena u ovom radu. Crnim linijama na slici označene su saobraćajne trake, kako bi se lakše tumačili dobijeni rezultati lokalizacije. Posmatrajući rezultat dobijen pomoću CB algoritma uočava se da je na celoj zvučnoj

mapi, odnosno prostoru od interesa, postoji ujednačen nivo zvučne energije. Ovakav rezultat lokalizacije nije u skladu s situacijom u kojoj je vršeno merenje, jer postoje zone u prostoru iz kojih se zvučna energija pojavljuje dominantno, npr. saobraćajne trake. Na osnovu ovakve lokalizacije izvora nije moguće dobiti pouzdanu raspodelu zvučne energije. Rezultat lokalizacije pomoću DAMAS2 algoritma prikazan je na Slici 6 b). Na slici se jasno uočavaju zone u kojima postoje zvučni izvori sa većom zvučnom energijom. Te zone se poklapaju sa saobraćajnim trakama, što odgovara realnoj situaciji u kojoj vozila prolaze ovom zonom i prave najveću buku u prostoru. Pored ovih zona postoje pozicije iz kojih se javlja nešto manja vrednost zvučne snage, a odgovaraju trotoaru i zoni parkiranih automobila. Rezultat lokalizacije pomoću CLEAN-SC algoritma takođe pokazuje zone u kojima postoji povećana zvučna energija, kao i kod prethodnog algoritma. Zone u prostoru se poklapaju sa saobraćajnim trakama, međutim, kod ovog algoritma te zone imaju manje vrednosti zvučne energije u poređenju sa DAMAS2 algoritmom. Na Slici 6 c) uočava se da osim saobraćajnih traka ne postoje druge zone u kojima se javlja koncentracija zvučne energije, već ostatak zvučne mape ima ujednačen nivo.

Na Slici 7 prikazane su funkcije gustine verovatnoće, odnosno raspodele, incidentnih uglova buke na fasadi dobijene pomoću mikrofonskog niza, za terčni opseg 1250 Hz. Način dobijanja raspodele uglova incidencije opisan je u prethodnom poglavlju. Sa Slike 7 uočava se da sva tri algoritma imaju minimum u funkciji gustine verovatnoće incidentnih uglova u opsegu od 0 do 5 stepeni, odnosno najmanje je verovatna pojava zvučne energije upravno na fasadu. Raspodele uglova incidencije dobijene na osnovu rezultata lokalizacije pomoću CB i CLEAN-SC algoritma poklapaju se u gotovo celom opsegu uglova incidencije. Ovakav rezultat je posledica ujednačene zvučne energije u prostoru koja je dobijena lokalizacijom. Postoje izvesna odstupanja između ove dve krive zbog toga što je pomoću CLEAN-SC algoritma lokalizovana povećana zvučna energija koja odgovara saobraćajnim trakama. Od 40° do 90° ove dve raspodele imaju ujednačene vrednosti, odnosno funkcija gustine verovatnoće se poklapa sa uniformnom raspodelom.



Sl. 7. Funkcije gustine verovatnoće uglova incidencije dobijene na osnovu tri algoritma za lokalizaciju

Uniformna raspodela incidentnih uglova znači da zvučna energija pogađa fasadu podjednako iz svih uglova. Funkcija gustine verovatnoće uglova incidencije dobijena na osnovu DAMAS2 algoritma za lokalizaciju ne poklapa se sa ostale dve funkcije gustine verovatnoće. U ovoj funkciji gustine verovatnoće postoje dva izražena lokalna maksimuma, koja odgovaraju pozicijama dve saobraćajne trake. Raspodela dobijena pomoću DAMAS2 algoritma u značajnoj meri odstupa od uniformne raspodele, odnosno od ujednačenosti zvučne energije koja pogađa fasadu. Sa Slike 7 uočava se da postoji povećana vrednost verovatnoće uglova bliskih 90°, koji su od posebne važnosti jer se za te incidentne uglove dobija najmanja vrednost zvučne izolacije fasadne pregrade.

Rezultati dobijeni u ovom merenju i korišćenjem tri različita algoritma daju različite raspodele uglova incidencije. Razlike su posledica osobina algoritama i njihovih ograničenja u realnim aplikacijama. Algoritam CB ima malu dinamiku prilikom lokalizacije zvučnih izvora, pa se dobija ujenačen nivo za ceo prostor koji se analizira. Ovakvo ograničenje CB algoritma dovodi do raspodele incidentnih uglova koja ne odgovara realnoj situaciji. Algoritam CLEAN-SC određuje tačno pozicije izvora u prostoru, međutim njegov rad bazira se na koherentnosti zvučnih izvora, pa neki zvučni izvori neće biti detektovani. Takvi izvori su u ovom merenju brze refleksije koje dolaze od trotoara ulice, pa se dobija ujednačena zvučna energija u tim zonama. Raspodela uglova incidencije dobijena na ovaj način daje bolji uvid u realnu situaciju od algoritma CB, ali i dalje nije potpuno tačna. DAMAS2 algoritam polazi od rezultata CB algoritma i dekonvolucionim tehnikama dolazi do stvarne raspodele zvučne energije. Rezultat lokalizacije zvučnih izvora pomoću ovog algoritma poklapa se sa očekivanim pozicijama zvučnih izvora za ovaj merni scenario. Zbog toga će i raspodela incidentnih uglova dobijena na ovaj način dati bolji uvid u realnu situaciju od prethodna dva algoritma.

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je metodologija za određivanje raspodele incidentnih uglova buke na fasadnim površinama u urbanim uslovima. Prikazani su rezultati za jedan frekvencijski opseg, ali je metodologija ista za bilo koji opseg. Korišćen je neregularni planarni mikrofonski niz sa 24 mikrofona koji je dizajniran za ovu namenu. Korišćena su tri algoritma za određivanje lokacije zvučnih izvora u prostoru i prikazane dobijene razlike u lokalizaciji. Prikazani rezultati pokazuju složenu raspodelu incidentne zvučne energije u urbanim uslovima koja zavisi od mnogo parametara. Dobijeni rezultati pokazuju da raspodela uglova nije uniformna, odnosno da zvučno polje nije difuzno, što je pretpostavka prilikom raznih analiza. Ovaj rad je deo tekućeg istraživanja u kom se analizira raspodela uglova incidencije u urbanim uslovima, za razne konfiguracije terena, visine od ulice, broja saobraćajnih traka itd. Rezultati istraživanja treba da posluže za klasifikaciju fasada u urbanim uslovima.

ZAHVALNICA

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

Republike Srbije. Autori posebno žele da se zahvale Branislavu Juranoviću i Milanu Koviniću bez kojih ovo istraživanje ne bi bilo moguće.

LITERATURA

- [1] 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.
- [2] D. Šumarac Pavlović, F. Pantelić, S. Bojičić, M. Bjelić, „Airborne sound insulation of monolithic partition as a function of incidence angles“, Proc. Forum Acusticum, Krakow 2014.
- [3] G.Vermeir, G.Geentjens, W.Bruyninckx, „Measurement and calculation experiences on façade sound insulation“, Proc INTER-NOISE 2004.
- [4] 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“.
- [5] ISO 717-1:1996 „Acoustics – rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation“.
- [6] 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.
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 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.
- [10] R.P. Dougherty, „Extensions of DAMAS and Benefits and Limitations of Deconvolution in Beamforming“, *AIAA*, 2961.11, 2005.
- [11] K. Ehrenfried, L. Koop, „A comparison of iterative deconvolution algorithms for the mapping of acoustic sources“, *AIAA journal*, 45.7:1584-1595, 2007.
- [12] P. Sijtsma, „CLEAN based on spatial source coherence“, *International journal of aeroacoustics*, 6.4:357-374, 2007.
- [13] 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.

ABSTRACT

Measurement of façade insulation values is performed with a sound source positioned under the angle of 45 ± 5 degrees, according to ISO 140-5. Due to dependence of façade insulation values from the angle under which a sound wave impedes a façade, it is of interest to examine the distribution of noise incidence angles on the façade in real scenarios. This paper presents a method for determining and analyzing noise incidence angles on facades in urban environments. As a measuring tool, a planar irregular microphone array with 24 microphones is used, which was designed for this application. Localization of sound sources in urban environments and distribution of energy over incidence angles is performed using several algorithms for microphone array signal processing.

Measurement of façade noise incidence angles in urban environments

Miloš Bjelić, Miodrag Stanojević, Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić