

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Miloš R. Bjelić

ANALIZA UGAONE RASPODELE
INCIDENTNE ENERGIJE SPOLJAŠNJE
BUKE PRIMENOM MIKROFONSKOG
NIZA

doktorska disertacija

Beograd, 2018.

UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Miloš R. Bjelić

ANALYSIS OF THE INCIDENT ENERGY
ANGULAR DISTRIBUTION OF AMBIENT
NOISE BY MICROPHONE ARRAY

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2018

Mentor:

dr DRAGANA ŠUMARAC PAVLOVIĆ, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Članovi komisije:

dr MIOMIR MIJIĆ, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

dr LJILJANA BRAJOVIĆ, vanredni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

dr MILAN MERKLE, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

ZAHVALNICA

Zahvaljujem se profesorki Dragani Šumarac Pavlović i profesoru Miomiru Mijiću koji su mi pružili jedinstvenu priliku da se bavim istraživačkim radom u oblasti akustike. Zahvaljujem im se jer sam imao priliku da od njih naučim mnogo toga što se ne može pronaći u knjigama, već jedino u iskustvu nastalom iz dugogodišnje posvećenosti akustici i rešavanju velikog broja složenih problema u praksi. Velikom podrškom, zalaganjem i savetima pomagali su mi da prevaziđem razne probleme koji su se javili do ovog trenutka. Zahvaljujem im na ogromnom doprinosu prilikom izrade ove disertacije, od njenog početka pa do samog kraja. Dugujem im zahvalnost ne samo za svoj naučni napredak, već i za razvoj svoje ličnosti jer su mi svojim ponašanjem i delom pomogli da bolje razumem život i postanem kvalitetniji čovek.

Posebnu zahvalnost dugujem Miodragu Stanojeviću kao prijatelju i kolegi sa kojim sam od treće godine osnovnih studija pa do danas uspešno savladavao sve naučno-istraživačke izazove koji su se našli pred nama. Njegov doprinos u izradi ove disertacije je nemerljiv i u ovako kratkoj formi nemoguće je nabrojati sve. I pored svog posla nalazio je vremena, često i vikendom, da se bavimo raznim temama prikazanim u ovoj disertaciji. Njegova pomoć bila je ključna u trenucima kada uspeh nije bio na vidiku. U razgovorima i diskusijama sa njim, kroz mnogobrojne zajedničke uspešne a i one manje uspešne eksperimente, izgrađeno je ovo što sada čini moju doktorsku disertaciju.

Zahvaljujem se profesorki Jeleni Čertić na nesebičnoj višegodišnjoj pomoći, kako u izradi disertacije tako i u nastavnim aktivnostima na fakultetu. Često je na sebe preuzimala deo mojih fakultetskih obaveza i tako omogućila da se više bavim istraživanjima na doktorskim studijama koja su dovela do ove disertacije. U gotovo svakodnevnim diskusijama pomogla mi je da razumem i rešim razne probleme na koje sam nailazio. Zahvaljujem joj na tome što me je usmeravala u radu sa studentima i pomogla da postanem kvalitetniji čovek i nastavnik.

Zahvaljujem se porodici na razumevanju i višedecenijskoj podršci u mom školovanju i verovanju u mene. Bez njihove bezrezervne podrške ne bih uspeo da dođem do ovog trenutka. Zahvaljujem se mnogobrojnim prijateljima na podršci i ohrabrivanju u toku doktorskih studija.

Zahvaljujem se kolegi Bogdanu Brkoviću koji me je svojom radoznalošću i čestim pitanjima u vezi sa raznim tema iz ove disertacije podstakao na razmišljanje i pronalaženje najboljih objašnjenja koja su napisani tekst učinila kvalitetnijim. Odgovarajući na njegova pitanja, a i potpitanja, razjašnjavao sam sebi dileme za koje nisam ni znao da postoje. Zahvaljujem mu na prijateljstvu i pomoći u prethodnih 10 godina provedenih na fakultetu.

Zahvaljujem se profesoru Milanu Merkleu i kolegici Milici Bogićević na velikodušnoj pomoći i savetima prilikom statističke analize podataka.

Zahvaljujem se Branislavu Juranoviću za izdvojeno vreme, odlične ideje i pomoć oko realizacije hardverskog prototipa mikrofonskog niza bez koga ovo istraživanje ne bi bilo moguće. Zahvaljujem se Milanu Koviniću na nesebičnoj pomoći u realizaciji višekanalnog sistema za akviziciju signala u koji je ugrađeno njegovo višegodišnje iskustvo iz oblasti audio elektronike. Zahvaljujem se Zoranu Đorđeviću na savetima i pomoći prilikom realizacije električnog dela mikrofonskog sistema.

Ova disertacija posvećena je pilotima 204. lovačkog puka koji su leteli 1999. godine i profesoru Husniji Kurtoviću.

Naslov teze: Analiza ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke primenom mikrofonskog niza

Rezime – Problem buke u savremenom svetu postao je danas jedan od nekoliko faktora koji dominatno utiču na život ljudi, bilo da se radi o životnom ili radnom prostoru. Problem buke naročito je izražen u urbanim uslovima, gde je struktura zvučnog polja vrlo složena jer buka potiče od velikog broja različitih i dislociranih zvučnih izvora koji emituju zvuk različitog nivoa i spektralnog sadržaja. Procena karakteristika zvučnog polja, odnosno vrste i prostorne distribucije izvora zvuka, kao i mogućnost klasifikacije pojedinih tipova izvora buke predstavljaju osnov za planiranje mogućih intervencija koje će dovesti do smanjenja nivoa buke u okruženju. Monitoring spoljašnje buke standardno se vrši na bazi merenja jednim neusmerenim mikrofonom.

Osnovna ideja rada je da se analizira mogućnost primene mikrofonskog niza za detaljnu vremensku, frekvencijku, i prostornu karakterizaciju zvučnog polja, lokalizaciju izvora i kategorizaciju urbanih zona. U okviru rada osmišljen je i realizovan mikrofonski niz sa malim brojem mikrofona čija je konfiguracija optimizovana u skladu sa zadatim frekvencijskim opsegom zvučnog polja u urbanim sredinama.

Primenom više algoritama za prostorno-vremensku obradu signala određena je struktura zvučnog polja u urbanim uslovima. Takođe, izvršeno je poređenje performansi algoritama u skladu sa postavljenim zahtevima i namenom rezultata. U okviru sprovedenih istraživanja izvršena su dugovremena merenja spoljašnje buke mikrofonskim nizom na različitim lokacijama i određena je struktura zvučnog polja u prostoru ispred fasade. Izabrane su lokacije koje se značajno razlikuju po konfiguraciji terena. Karakteristike polja na svim posmatranim lokacijama detaljno su analizirane u pogledu lokalizacije i karakterizacije izvora zvuka.

Razvijena je metodologija za eksperimentalno određivanje ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke na fasadi na osnovu rezultata lokalizacije. Dobijene raspodele korišćene su u daljoj analizi kao osnov za statističku kategorizaciju urbanih zona. Izvršena je višedimenziona statistička analiza ugaonih raspodela spoljašnje buke za različite lokacije u urbanim uslovima sa ciljem da se utvrde kategorije sa sličnim

karakteristikama zvučnog polja. Eksperimentalno određene ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke korišćene su za predikciju izolacione moći fasadnih pregrada. Proračun terenske izolacione moći fasadnih pregrada izvršen je na osnovu poznatih građevinskih parametara i eksperimentalno utvrđene ugaone raspodele incidentne energije. Time je stvorena mogućnost za sagledavanje razlika u ostvarenim vrednostima izolacione moći fasadne pregrade za različite kategorije urbanih zona.

Ključne reči: Mikrofonski niz, Ugaona raspodela, Spoljašnja buka, Saobraćajna buka, Izolacija, Fasada

Naučna oblast: Elektrotehnika

Uža naučna oblast: Akustika

UDK broj: 621.3

Dissertation title: Analysis of the incident energy angular distribution of ambient noise by microphone array

Summary – The noise problem in today’s modern world has become one of the key factors that dominantly influence the lives of people in both the living and working areas. The noise problem is particularly expressed in the urban environments, where the structure of the sound field is quite complex due to a large number of different and spatially dislocated sound sources, which emit sounds of different levels and spectral content. The assessment of the sound field characteristics, i.e. the type and the spatial distribution of the sound sources, as well as the possibility of classifying individual types of noise sources, form the basis for planning potential interventions which would lead to a decrease in the environment’s noise levels. Standard outdoor noise monitoring is based on the measurements with one omnidirectional microphone.

The basic idea of this work is to analyze the possibilities of microphone array application for a detailed temporal, spectral and spatial characterization of the sound field, source localization and urban area categorization. A microphone array with a small number of microphones, whose configuration is in accordance with the frequency range of the sound field in urban environments, has been designed and realized within the scope of this research.

The sound field structure in urban areas has been determined using several algorithms for space-time signal analysis. Furthermore, the comparison of algorithms’ performance has been conducted in accordance with given demands and results’ aims. Within the research, long time interval measurements of the outdoor noise were performed in various locations and the sound field structure in front of the façade was determined. The selected locations have significant differences in terms of terrain configuration. The characteristics of the sound field in all the observed locations were analyzed in detail in terms of localization and characterization of sources.

Based on the localization results, a methodology was developed for the experimental determination of the angular distribution of the outdoor noise incidence energy. Obtained distributions were used in the detailed analysis as the basis for statistical

categorization of the urban zones. Multidimensional statistical analysis of the outdoor noise angular distribution was performed for different locations within the urban area, with the goal of determining the categories with the similar characteristics of the sound field. Experimentally determined outdoor noise incidence energy angular distributions were used for predicting the façade's sound reduction index values. The calculation of the in-situ sound reduction index of façade partitions was based on known physical parameters of the partitions and the experimentally obtained incident energy angular distributions. This procedure allowed for the comparison of differences in the achieved values of the façade partition sound reduction index for different categories of urban zones.

Keywords: Microphone array, Angular distribution, Ambient noise, Traffic noise, Insulation, Façade

Scientific area: Electrical engineering

Scientific subarea: Acoustics

UDK code: 621.3

Sadržaj:

1	UVOD.....	1
2	MIKROFONSKI NIZ I ALGORITMI ZA OBRADU SIGNALA	6
2.1	UVOD.....	6
2.2	PODELA MIKROFONSKIH NIZOVA PREMA GEOMETRIJI	8
2.3	DIAGRAM USMERENOSTI MIKROFONSKOG NIZA.....	11
2.3.1	<i>Prostorna rezolucija mikrofonskog niza.....</i>	<i>15</i>
2.3.2	<i>Bočni lobovi mikrofonskog niza.....</i>	<i>19</i>
2.4	ALGORITMI ZA PROSTORNO-VREMENSKU OBRADU SIGNALA	22
2.4.1	<i>Delay and sum algoritam</i>	<i>22</i>
2.4.2	<i>Konvencionalni beamforming.....</i>	<i>25</i>
2.4.3	<i>Dekonvolucioni algoritmi.....</i>	<i>27</i>
2.4.4	<i>DAMAS.....</i>	<i>29</i>
2.4.5	<i>DAMAS2.....</i>	<i>30</i>
2.4.6	<i>CLEAN-SC.....</i>	<i>32</i>
2.4.7	<i>Poređenje rezultata dobijenih različitim algoritmima za lokalizaciju.....</i>	<i>34</i>
3	DIZAJN I HARDVERSKA REALIZACIJA MIKROFONSKOG NIZA OPTIMIZOVANOG ZA MONITORING SAOBRAĆAJNE BUKE.....	37
3.1	UVOD.....	37
3.2	KARAKTERISTIKE SAOBARAĆAJNE BUKE	39
3.3	ALGORITAM ZA OPTIMIZACIJU POZICIJA MIKROFONA U MIKROFONSKOM NIZU	40
3.3.1	<i>Rezultati algoritma</i>	<i>45</i>
3.4	HARDVERSKA REALIZACIJA	48
3.4.1	<i>Mikrofonski niz.....</i>	<i>49</i>
3.4.2	<i>Mehanička konstrukcija i komponente</i>	<i>52</i>
3.4.3	<i>Akviziциони sistem</i>	<i>53</i>
4	ANALIZA ZVUČNOG POLJA U SPOLJAŠNJOJ SREDINI UPOTREBOM MIKROFONSKOG NIZA.....	55
4.1	UVOD.....	55
4.2	MERNE LOKACIJE.....	57
4.3	IZBOR PARAMETARA ZA ALGORITME PROSTORNO-VREMENSKE OBRADU SIGNALA.....	61
4.4	NAČIN PRIKAZIVANJA REZULTATA LOKALIZACIJE	64
4.5	REZULTATI I DISKUSIJA.....	66
4.5.1	<i>Poređenje različitih algoritama za prostorno-vremensku obradu signala.....</i>	<i>66</i>
4.5.2	<i>Lokalizacije izvora za različite merne lokacije.....</i>	<i>69</i>
4.5.3	<i>Spektralne karakteristika različitih izvora buke</i>	<i>72</i>

4.5.4	<i>Lokalizacija izvora za različite visine mikrofonskog niza</i>	75
4.5.5	<i>Uticao udaljenosti ravni skeniranja na rezultat lokalizacije</i>	77
5	UGAONA RASPODELA INCIDENTNE ENERGIJE SPOLJAŠNJE BUKE NA FASADI... 80	
5.1	UVOD.....	80
5.2	IZRAČUNAVANJE UGAONE RASPODELE INCIDENTNE ENERGIJE.....	81
5.3	EKSPERIMENTALNO ODREĐENE UGAONE RASPODELE SPOLJAŠNJE BUKE NA FASADI.....	83
5.3.1	<i>Uporedna analiza različitih algoritama za obradu signala.....</i>	83
5.3.2	<i>Ugaone raspodele za različite merne lokacije.....</i>	85
5.3.3	<i>Ugaone raspodele za različite visine mikrofonskog niza.....</i>	88
5.4	ALGORITAM ZA STATISTIČKU ANALIZU I KATEGORIZACIJU MERNIH LOKACIJA	90
5.4.1	<i>Prvi korak algoritma – izračunavanje medijane i distanci do medijane</i>	91
5.4.2	<i>Drugi korak - kategorizacija distanci.....</i>	92
6	PRORAČUN IZOLACIONE MOĆI FASADNIH PREGRADA 95	
6.1	UVOD.....	95
6.2	IZOLACIONA MOĆ FASADE	96
6.2.1	<i>Koeficijent i impedansa transmisije.....</i>	97
6.2.2	<i>Zakon mase.....</i>	100
6.3	UTICAJ KOINCIDENCIJE NA IZOLACIONU MOĆ PREGRADE.....	102
6.4	RASPODELA UGLOVA INCIDENCIJE I IZOLACIONA MOĆ.....	111
7	PRORAČUN TERENSKE IZOLACIONE MOĆI FASADNIH PREGRADA NA OSNOVU SA EKSPERIMENTALNO ODREĐENIH UGAONIH RASPODELA..... 114	
7.1	UVOD.....	114
7.2	METODOLOGIJA PRORAČUN IZOLACIONE MOĆI FASADNE PREGRADE	115
7.3	REZULTATI PRORAČUNA FASADNIH PREGRADA	116
7.3.1	<i>Uporedna analiza proračuna za različitih algoritama za lokalizaciju.....</i>	117
7.3.2	<i>Uporedna analiza proračuna za različite merne lokacije</i>	119
7.3.3	<i>Uporedna analiza proračuna za različite visine mikrofonskog niza</i>	125
7.4	ANALIZA OSTVARENIH VREDNOSTI IZOLACIONE MOĆI PO KATEGORIJAMA	127
7.5	DISKUSIJA REZULTATA	136
8	ZAKLJUČAK 138	
8.1	NAUČNI DOPRINOSI.....	141
8.2	BUDUĆA ISTRAŽIVANJA	142
9	LITERATURA..... 144	
10	PRILOZI 152	

1 Uvod

Problem buke u savremenom svetu postao je danas jedan od nekoliko faktora koji dominatno utiču na dobrobit i zdravlje ljudi [1]. Bukom se naziva svaki neželjen zvuk [2]. Istraživanja su pokazala da je veliki broj ljudi permanentno izložen nivoima buke koji premašuju neke ustanovljene granične vrednosti. Smatra se da je danas preko 60% stanovništva na tlu Evrope izloženo prekomernim nivoima buke u prostorijama gde ljudi duže borave [3]. Može se reći da je u svakodnevnom životu čoveka izloženost buci neizbežna pojava.

Današnji način života generiše brojne faktore koji doprinose pogoršanju stanju buke, posebno u urbanim sredinama [4]. Stalno se povećava broj uređaja koji kao nuspojavu generišu zvuk, široka je dostupnost jeftinih, a moćnih uređaja za reprodukciju zvuka, a postoje i drugi faktori koje je sobom donela savremena tehnologija doprinoseći pogoršanom stanju buke u životnoj sredini. Ipak, najznačajniji u tome su dva fundamentalna faktora. To su povećanje koncentracije ljudi na malom prostoru i permanentno povećanje gustine saobraćaja na ulicama.

Postoje dva važna preduslova za inženjersko sagledavanje problema buke i njegovo efikasno rešavanje. To su:

- mogućnost procene karakteristika zvučnog polja, što znači vrste i prostorne distribucije izvora zvuka, i
- mogućnost klasifikacije pojedinih tipova izvora buke.

To je osnov za planiranje mogućih intervencija koje će dovesti do smanjenja nivoa buke u okruženju.

Savremene tehnike za prostorno-vremensku obradu signala bazirane na mikrofonskim nizovima omogućavaju prostornu, vremensku i frekvencijsku procenu karakteristika zvučnog polja [5], što je od suštinskog značaja za analizu različitih problema iz domena zaštite od buke i zvučne izolacije. Na taj način dva navedena preduslova mogu se ispuniti odgovarajućom metodologijom koja bi se zasnivala na korišćenju mikrofonskih nizova kao alata.

Mikrofonski nizovi predstavljaju multisenzorski sistem koji omogućava kompleksan monitoring zvučnog polja. Pomoću njih i algoritama za prostorno-vremensku obradu signala moguće je odrediti pravce nailaska zvuka, odnosno odrediti strukturu zvučnog polja u analiziranom prostoru [6]. Međutim, akustički domen karakteriše jedan važna specifičnost. Ona se ogleda u veoma širokom rasponu talasnih dužina, odnosno frekvencija, koje su od značaja. Širina opsega frekvencija od značaja u akustici je tri dekade (1:1000) i isti je toliki raspon talasnih dužina, što proizilazi iz karakteristika čovekovog čula sluha. Ta činjenica, za razliku od drugih oblasti gde se primenjuju senzorski nizovi, zahteva specifične načine optimizacije hardverskih i softverskih rešenja u realizaciji mikrofonskih nizova. Zbog toga je njihova primena u akustici delikatna tema.

Jedan od važnih razloga detaljne analize strukture zvučnog polja u spoljašnjoj sredini je što preciznije utvrđivanje kriterijuma za potrebnu zvučnu izolaciju fasadnih pregrada na zgradama kako bi se u radnim i boravišnim prostorijama postigao zadovoljavajući akustički komfor. Izolaciona svojstva građevinskih pregrada zavise od primenjenih materijala i konstrukcija, ali takođe i od raspodele incidentne energije koja ih pogađa [7]. Upravo na toj činjenici se bazira osnovna ideja o analizi strukture zvučnog polja na fasadama zgrada pomoću mikrofonskih nizova i odgovarajuće prostorno-vremenske obrade signala, kojom se bavi ova teza.

U ovoj disertaciji kombinovane su tri istraživačke teme. Prva tema bavi se mogućnostima efikasne hardverske i softverske realizacije mikrofonskog niza koji je optimizovan za mapiranje spoljašnje buke. Optimizacija se odnosi na izbor geometrije niza koja će sa najmanjim brojem mikrofona omogućiti maksimalnu selektivnost niza za zadate karakteristke buke koja se očekuje u urbanoj sredini, kao i izbor odgovarajućeg algoritma kojim se postiže dovoljna prostorna rezolucija lokalizacije zvučnih izvora kakvi se javljaju u njoj. Kao ulazni podaci u procesima hardverske i softverske optimizacije uzeti su rezultati analize spoljašnje buke dostupni u literaturi [8], [9].

Druga tema u ovoj tezi je eksperimentalna analiza spoljašnje buke na osnovu poznatih karakteristika optimizovanog mikrofonskog niza i algoritama za prostorno vremensku analizu zvučnog polja. To podrazumeva veći broj dugovremenih merenja u različitim urbanim okruženjima sa specifičnim mikro konfiguracijama zgrada. Ovaj deo

istraživanja ima za cilj da pokaže u kojoj meri lokalne karakteristike zvučnog polja variraju u zavisnosti od specifičnosti mikrokonfiguracija određenih urbanih delova, šta su dominantni izvori buke na pojedinim karakterističnim lokacijama, kakve su frekvencijske i intenzitetske razlike dominantnih izvora buke, kao i njihova prostorna distribucija. Krajnji cilj ovog dela istraživanja je da se na osnovu vremenskih, frekvencijskih i prostornih razlika u strukturi zvučnog polja, a uz upotrebu predloženih algoritama, izvrši kategorizacija urbanih zona u odnosu na višedimenzionalne razlike u strukturi polja.

Najzad, treća tema se bavi estimacijom izolacione moći fasadnih pregrada u uslovima realne incidencije zvučne energije na osnovu eksperimentalno dobijenih raspodela, a po matematičkom modelu izolacione moći prikazanom u teoriji. Poredeći vrednost izolacione moći dobijene s realnim raspodelama energije pregrade i sa teorijskom ugaonom raspodelom koja odgovara difuznom zvučnom polju moguće je definisati preporuke za optimalne kriterijume pri izboru materijalizacije fasada na zgradama u urbanoj sredini.

U skladu sa tri navedene istraživačke teme i ova disertacija je organizovana u tri celine. Nakon uvoda, prvu celinu čine poglavlja 2 i 3 u kojima su izloženi uvodni pojmovi iz oblasti mikrofonskih nizova i prostorno-vremenske obrade njihovih signala. U drugom poglavlju prikazana je podela mikrofonskih nizova prema rasporedu mikrofona u prostoru, što se naziva geometrija mikrofonskog niza. Zatim su prikazane najvažnije karakteristike mikrofonskih nizova kao što su: dijagram usmerenosti, širina glavog loba i pojava bočnih lobova. Nakon toga predstavljeni su algoritmi za prostorno-vremensku obradu signala koji se koriste za određivanje pravca nailaska zvuka na mikrofonski niz. Prikazan je osnovni i u literaturi najčešće korišćeni algoritam *Delay and Sum (DaS)* sa objašnjenjem njegovih prednosti i ograničenja. Zatim su prikazani napredniji algoritmi za obradu signala kojim se postiže veća dinamika pri lokalizaciji zvučnih izvora u prostoru. Na kraju poglavlja prikazani je eksperiment u kom su upoređeni predstavljeni algoritmi sa ciljem njihovog međusobnog poređenja. U trećem poglavlju prikazan je konkretan dizajn mikrofonskog niza koji je korišćen za analizu saobraćajne buke u ovom radu. Detaljno je izložen postupak optimizacije pozicije mikrofona u prostoru sa ciljem da se postignu što bolje karakteristike niza, pri zadatim brojem mikrofona i sa

zadatim radnim frekvencijskim opsegom. Prikazane su karakteristike saobraćajne buke u urbanim uslovima koje utiču na izbor radnog frekvencijskog opsega niza. Mikrofonski niz sa optimizovanim pozicijama mikrofona upoređen je sa drugim geometrijama nizova iz literature. Nakon toga prikazan je postupak realizacije prototipa mikrofonskog niza i pratećih mehaničko-električnih komponenti koje su potrebne za funkcionisanje sistema. Detaljno je prikazan realizovani sistem za višekanalnu akviziciju signala sa mikrofona, kao i algoritam za ekvalizaciju frekvencijske karakteristike mikrofona.

Drugu celinu disertacije čine poglavlja 4 i 5. U njima je izložena metodologija i dobijeni rezultati eksperimentalnog istraživanja koje je imalo za cilj mapiranje zvučnog polja uz pomoć realizovanog mikrofonskog niza, utvrđivanje dominantnih izvora buke i njihovih specifičnih frekvencijskih karakteristika. Sve to je kao krajni cilj omogućilo kategorizaciju urbanih zona na osnovu razlika u karakteru zvučnog polja, odnosno ugaone raspodele incidentne energije na površini zgrada. U poglavlju 4 prikazane su lokacije u urbanim uslovima na kojima su izvršena snimanja buke pomoću mikrofonskog niza. Za svaku lokaciju prikazani su geometrijski parametri koji određuju profil terena u kom se nalazi fasada zgrade gde je postavljen mikrofonski niz. Opisani su parametri i njihove vrednosti koje su korišćene u algoritmima za prostorno-vremensku obradu signala. U ovom poglavlju prikazani su i rezultati lokalizacije zvučnih izvora u prostoru pomoću tri korišćena algoritma za svaku mernu lokaciju.

U petom poglavlju predstavljen je postupak za određivanje funkcije gustine verovatnoće ugaone raspodele spoljašnje buke na fasadi zgrade na osnovu rezultata algoritama za obradu signala sa mikrofonskog niza, prikazanih u prethodnom poglavlju. Dobijene su funkcije gustine verovatnoće za različite konfiguracije terena, različite algoritme, kao i različite visine postavljanja mikrofonskog niza. Diskutovane su razlike u oblicima raspodela u ovim slučajevima. Nakon toga predstavljen je algoritam za višedimenzionu statističku analizu pomoću koga je izvršena kategorizacija mernih mesta na osnovu oblika raspodela. Kao rezultat dobijeno je nekoliko kategorija mernih mesta na osnovu kojih su u disertaciji vršene dalje analize.

Treći deo disertacije čine poglavlja 6 i 7. Ona su posvećena problemu proračuna zvučne izolacije fasadnih pregrada u posmatranim urbanim uslovima. U poglavlju 6 prikazani su matematički modeli za predikciju vrednosti izolacione moći pregrade za koju su

poznati relevantni fizički parametri. Prikazano je nekoliko modela iz literature i objašnjeni su nedostaci sa stanovišta predikcije ostvarene vrednosti izolacione moći. Detaljno je objašnjen model za predikciju koji obuhvata sve pojave pri prostiranju zvuka kroz pregradu i koji je korišćen u ovoj disertaciji. Na kraju poglavlja dat je primer proračuna jedne monolitne betonske pregrade.

U sedmom poglavlju prikazani su rezultati proračuna izolacione moći fasadnih pregrada na osnovu eksperimentalno dobijenih raspodela po matematičkom modelu prikazanom u prethodnom poglavlju. Ugaona raspodela incidentne energije spoljašnje buke, dobijena je na osnovu prostornog mapiranja zvučnog polja u ravni fasade, upotrebljena je u proračun izolacione moći najčešćih fasadnih elemenata, betonkih zidova i prozora. Izvršena je procena promene ispoljenih izolacionih svojstava posmatranih standardnih pregrada u različitim kategorijama urbanih okruženja. Radi poređenja izračunate su i vrednosti izolacione moći pregrada u okolnostima teorijske ugaone raspodele incidentne energije koja odgovara difuznom zvučnom polju. U disertaciji su prikazani rezultati za dve najčešće korišćene materijalizacije fasadnih pregrada u praksi kada se nalaze u različitim uurbanim uslovima. Detaljno su analizirane dobijene vrednosti za različita merna mesta, različite algoritme za obradu signala i različite visine postavljana mikrofonskog niza. Na osnovu kategorizacije mernih mesta iz petog poglavlja analizirane su razlike u ostvarenoj izolacionoj moći za različite kategorije urbanih lokacija. Diskutovane su odstupanja merodavne vrednosti izolacione moći od teorijske vrednosti i objašnjeni razlozi za konstatovane razlike.

U poslednjem, osmom poglavlju, sumirani su ostvareni rezultati i izneti zaključci do kojih se došlo u istraživanjima prikazanim u disertaciji. Istaknuti su takođe i ostvareni naučni doprinosi disertacije. Na kraju su date smernice za buduća istraživanja i dalje unapređenja koja je moguće ostvariti u ovoj oblasti. Disertacija ima relativno veliki obim priloga. Oni detaljnije prikazuju sve rezultate sprovedenih analiza razmatranih u različitim poglavljima. Oni su izdvojeni da se izbeglo opterećenje osnovnog teksta rada i njegovo lakše praćenje.

2 Mikrofonski niz i algoritmi za obradu signala

2.1 Uvod

Mikrofonski niz predstavlja sistem koji se sastoji od više mikrofona raspoređenih u prostoru na neki poznat način. Raspored mikrofona u prostoru naziva se geometrija niza [10]. Naziv mikrofonski niz nastao je na početku njihovog razvoja, kada je razmatran samo slučaj mikrofona koji su u prostoru raspoređeni duž jedne linije, to jest u nizu. Ipak, takav naziv se zadržao do danas iako se uglavnom koriste sistemi kod kojih raspored mikrofona nije linijski. Broj mikrofona, kao i geometrija mikrofonskog niza direktno određuju njegove performanse u praktičnim aplikacijama.

Početna pretpostavka je da su svi mikrofoni u nizu neusmereni, što znači da imaju jednak odziv na zvučnu pobudu nezavisno od pravca nailaska zvučnog talasa. Međutim, više neusmerenih mikrofona u prostoru zajedno postaju usmeren sistem, što znači da mikrofonski niz ispoljava usmerenost u određenom pravcu. Njegova usmerenost se kvantifikuje pomoću dijagrama usmerenosti. Oblik usmerenosti mikrofonskog niza zavisi od broja mikrofona, njihovog rasporeda u prostoru i frekvencije [10]. Da bi se ostvarila usmerenost niza na niskim frekvencijama potrebno je da su mikrofoni raspoređeni na dovoljno velikom prostoru. Za opisivanje mikrofonskog niza u literaturi se koristi parametar koji se naziva otvor mikrofonskog niza. On predstavlja rastojanje između dva najudaljenija mikrofona u nizu i određuje donju graničnu frekvenciju radnog opsega mikrofonskog niza [11]. Za usmeravanje na visokim frekvencijama potrebno da mikrofoni budu na međusobno bliskom rastojanju [12]. Zahteve za usmeravanjem na niskim i na visokim frekvencijama moguće je ispuniti ukoliko se koristi veliki broj mikrofona, što usložnjava sistem i povećava njegovu cenu. Zbog toga ispunjenje oba zahteva često nije moguće, pa se za mnoge praktične aplikacije ograničava radni opseg mikrofonskog niza.

Raspoređenost mikrofona u prostoru omogućava prostorno uzorkovanje zvučnog polja, a ne samo vremensko uzorkovanje koje se postiže uzimanjem signala sa jednog mikrofona. Zbog razlika u rastojanjima pojedinih mikrofona u nizu od zvučnog izvora koji emituje zvuk javlja se vremenska razlika u stizanju zvučnog talasa do njih. Pored vremenskih javljaju se i izvesne amplitudske razlike između signala na mikrofona.

Na osnovu vremenskih i amplitudskih razlika mikrofonskih signala može se odrediti pravac nailaska zvučnog talasa, a time i položaj zvučnog izvora u prostoru [13]. Zbog toga je kroz istoriju primarna namena mikrofonskog niza bila lokalizacija zvučnih izvora.

Lokalizacija izvora u prostoru pomoću mikrofonskog niza poznata je u literaturi pod nazivom *beamforming* [6]. Uz mikrofonski niz može se koristiti video kamera koja omogućava vizualizaciju prostora u kom se vrši lokalizacija izvora. Zvučna slika dobijena pomoću mikrofonskog niza mapira se na video sekvencu što omogućava lakšu analizu dobijenih rezultata. Sistem koji se sastoji od mikrofonskog niza i video kamere poznat je pod nazivom akustička kamera [14].

Preduslov koji mora biti ispunjen da bi se mikrofonski niz mogao koristiti za lokalizaciju zvučnih izvora je poznavanje geometrije niza, a to znači tačnog položaja mikrofona u prostoru. Preciznost lokalizacije izvora u prostoru zavisi od performansi samog mikrofonskog niza, pa rezultat lokalizacije dobijen na ovaj način ne predstavlja uvek stvarnu sliku zvučnog polja. Druga važna namena mikrofonskog niza kao alata u analizi zvučnog polja je i izdvajanje zvuka iz željenog prostornog pravca [15]. Na osnovu poznate geometrije niza i poznatog pravca iz kog je potrebno izdvojiti zvuk moguće je usmeriti dijagram usmerenosti mikrofonskog niza u tom pravcu i odgovarajućom kombinacijom signala sa mikrofona izvršiti izdvajanje signal iz željenog pravca. Zbog toga se u literaturi za mikrofonski niz može pronaći i termin prostorni filter [15].

Teorijski koncept mikrofonskih nizova poznat je relativno dugo u literaturi. Potekao je iz drugih oblasti gde se više senzora koristi za određivanje lokacije izvora u prostoru. To su pre svega oblast antenskih nizova, sonar, radio astronomija itd. [13]. Matematički modeli koji se koriste u ovim oblastima vrlo su slični i sa manjim izmenama mogu se primeniti u svim oblastima. Razlika između njih je jedino u načinu prostiranja talasa, to jest u njihovoj brzini. Akustika se bavi zvučnim poljem u veoma širokom frekvencijskom opsegu. Za razliku od ostalih oblasti zvučni signal nalazi se u osnovnom opsegu, odnosno nije modulisan, što može predstavljati olakšavajuću okolnost prilikom obrade signala. Međutim, pošto se uobičajno analiza zvuka vezuje za čujni frekvencijski opseg čoveka koji je od 20 Hz do 20 kHz, ta činjenica predstavlja otežavajuću okolnost.

Akustički signal je širokopojasan, pa se matematički modeli iz drugih oblasti moraju prilagoditi toj realnosti.

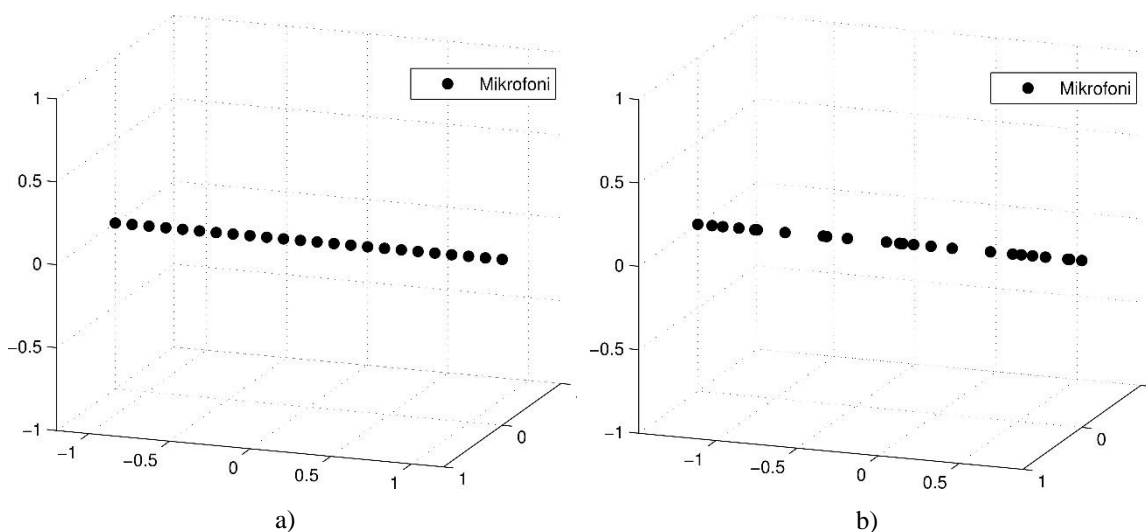
I pored toga što je mikrofonski niz poznat jako dugo pravi razvoj ovog sistema počeo je sa intenzivnim razvojem računarske tehnike. Računari su omogućili implementaciju i usavršavanje algoritama za prostorno-vremensku obradu signala koje nije bilo moguće jednostavno realizovati analognim kolima. Takođe, razvojem računara i višekanalnih analogno-digitalnih konvertora (engl. *Analog-Digital Converter*, ADC) omogućeno je i povećanje broja mikrofona u mikrofonskom nizu, čime se može ostvariti detaljniji uvid u prostornu strukturu zvučnog polja. Zbog toga su danas mikrofonski nizovi nezaobilazan alat za analizu zvučnog polja u mnogim inženjerskim oblastima. Oni se koriste u auto industriji prilikom dizajna i testiranja delova automobila [16], u avio industriji [17], u detekciji kvarova koji su praćeni nekim poremećajem zvučnog polja [18], u akustičkoj analizi prostorija [19], [20], zvučnoj izolaciji [20], [21], itd.

U ovom poglavlju prikazane su osnovne karakteristike mikrofonskih nizova koje su važne kako sa teorijskih aspekata, tako i sa stanovišta praktične primene u njihovim aplikacijama. Prikazane su različite konfiguracije mikrofonskih nizova koje se mogu pronaći u literaturi i izvršeno je njihovo poređenje. Pošto se mikrofonski niz u ovoj disertaciji koristi za određivanje lokacije zvučnih izvora fokus u ovom poglavlju biće lokalizacija izvora, a ne prostorno izdvajanje zvuka. Prikazan je način za određivanje dijagrama usmerenosti mikrofonskog niza, prostorna rezolucija koja se može postići mikrofonskim nizom i pojam bočnih lobova. Takođe prikazani su i algoritmi za prostorno-vremensku obradu signala koji su korišćeni u ovoj disertaciji. Pored bazičnih algoritama koji se najčešće koriste u komercijalno dostupnim rešenjima, prikazani su i napredni algoritmi pomoću kojih se može ostvariti preciznija analiza zvučnog polja. Na kraju su prikazani rezultati lokalizacije zvučnih izvora pomoću jednog mikrofonskog niza i različitih algoritama za obradu signala u realnom eksperimentu.

2.2 Podela mikrofonskih nizova prema geometriji

Na osnovu rasporeda mikrofona u prostoru mikrofonski nizovi se mogu podeliti u tri grupe: linijski, planarni i prostorni [10]. Kod linijskih (1D) mikrofonskih nizova mikrofoni su raspoređeni tako da geometrijski čine jednu duž, pa je pozicija mikrofona

u prostoru definisna samo jednom koordinatom Dekartovog koordinatnog sistema. Na Slici 2.1 prikazani su neki primeri linijskih mikrofonskih nizova. U ovom prikazu je usvojeno da svi prikazani nizovi imaju 24 mikrofona i da su na slikama dimenzije izražene u metrima. Broj mikrofona uzet je proizvoljno, ali je važno da on bude isti za sve nizove da bi kasnije bilo moguće međusobno porediti njihove performanse.

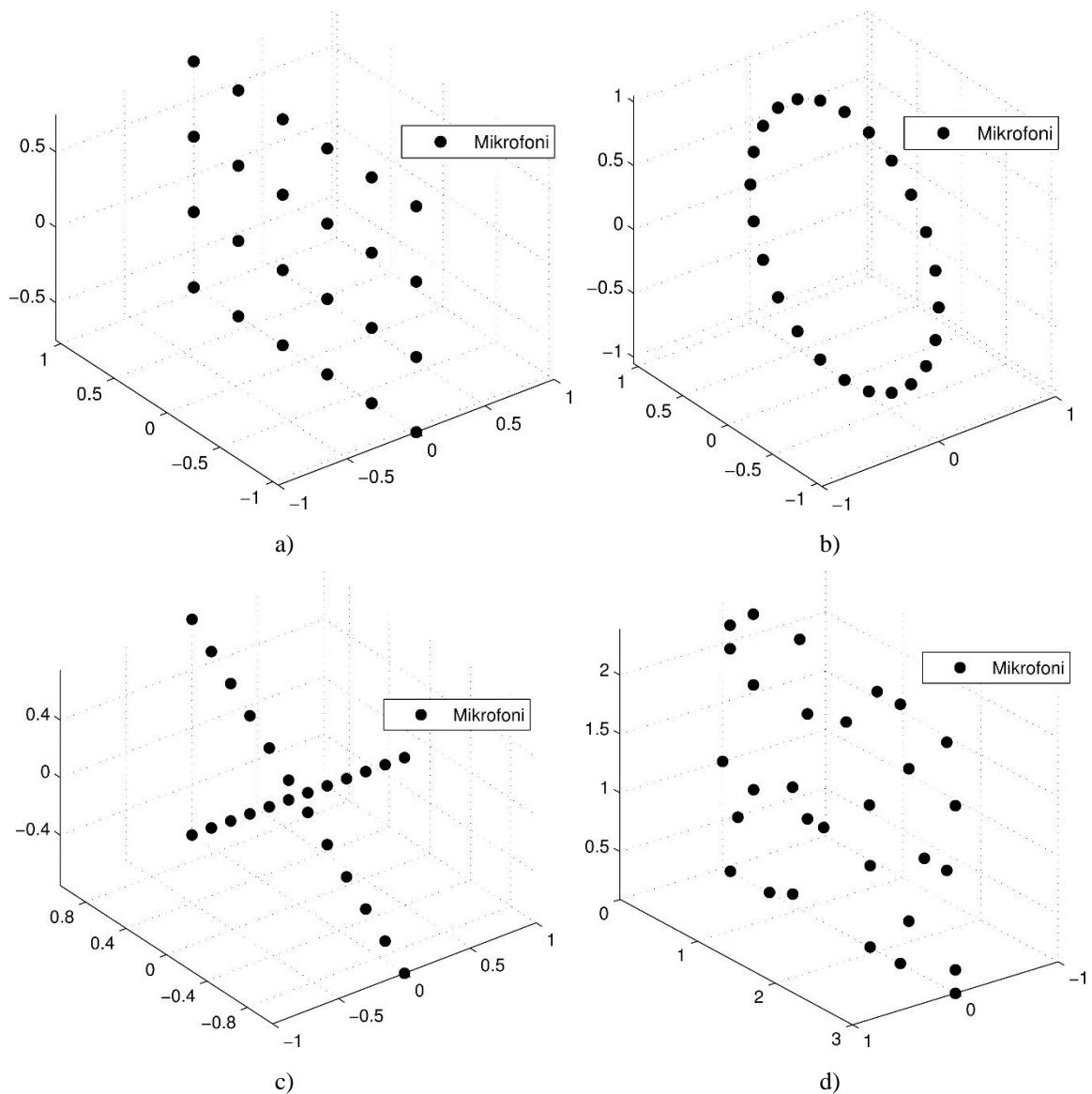


Slika 2.1 Raspored mikrofona u prostoru linijskog mikrofonskog niza za: a) regularnu strukturu, b) neregularnu strukturu

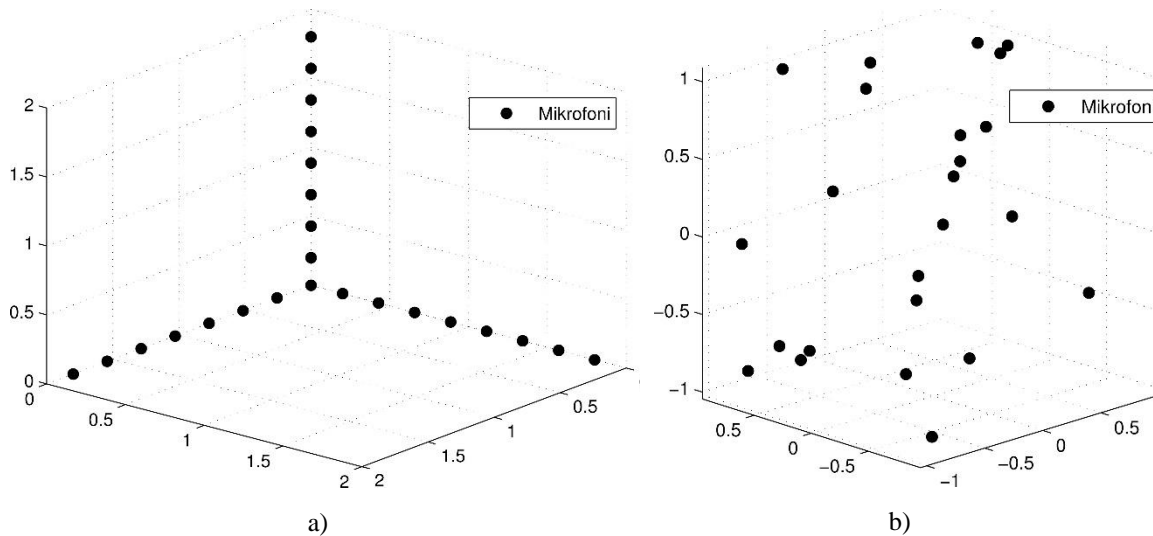
Planarni (2D) mikrofonski nizovi podrazumevaju da su mikrofoni raspoređeni tako da se svi nalaze u istoj ravni. Zbog toga je pozicija mikrofona definisana pomoću dve koordinate. Na Slici 2.2 prikazana su četiri različita planarna mikrofonska niza. Svi oni imaju približno jednak otvor niza. Najzad, kod prostornih mikrofonskih nizova mikrofoni su raspoređeni tako da ne leže ni u ravan ni na pravoj, već su raspoređeni u prostoru (3D), pa se položaj mikrofona definiše pomoću tri koordinate. Primeri prostornih mikrofonskih nizova prikazani su na Slici 2.3.

Svaka od tri geometrijske grupe nizova može se dodatno podeliti na regularne i neregularne. Kod regularnih mikrofonskih nizova međusobna rastojanja između mikrofona se ponavljaju, pa mikrofoni prostorno čine neku pravilnu geometrijsku strukturu. Primeri regularnih mikrofonskih nizova prikazani su na Slikama 2.1 a), 2.2 a), 2.2 b), 2.2 c) i 2.3 a). Za razliku od njih neregularne mikrofonske nizove čine mikrofoni

koji ne formiraju pravilnu geometrijsku strukturu, to jest rastojanja između mikrofona su nejednaka. Neregularni mikrofonski nizovi prikazani su na Slikama 2.1 b), 2.2 d) i 2.3 b). Neregularne strukture mikrofonskih nizova mogu biti dobijene slučajnim raspoređivanjem mikrofona u prostoru ili nekim optimizacionim postupkom koji ima za cilj ostvarivanje određenih performansi niza [11].



Slika 2.2 Raspored mikrofona u prostoru planarnog mikrofonskog niza za: a) pravouganu (grid) strukturu, b) kružnu strukturu, c) „x“ strukturu i d) neregularnu strukturu



Slika 2.3 Raspored mikrofona prostornog mikrofonskog niza za: a) regularnu strukturu, b) neregularnu strukturu

2.3 Dijagram usmerenosti mikrofonskog niza

Dijagram usmerenosti mikrofonskog niza (*beam pattern*) predstavlja odziv mikrofonskog niza na pobudu iz zvučnog polja u prostoru. Uobičajno se pretpostavlja da je dijagram usmerenosti pojedinačnih mikrofona u nizu sfera, to jest da su mikrofoni neusmereni. Usvajajući pretpostavku da se mikrofonski niz nalazi u dalekom zvučnom polju zvučnog izvora, njegov dijagram usmerenosti definiše se na sledeći način [10]:

$$W(\vec{k}) = \sum_{n=0}^M w_n \exp(-j\vec{k} \cdot \vec{p}_n). \quad 2.1$$

gde \vec{k} predstavlja talasni broj koji odgovara određenom prostornom uglu, M je ukupan broj mikrofona, \vec{p}_n predstavlja vektor pozicija mikrofona, dok w_n predstavlja težinske koeficijente za pojedinačne mikrofone. Za izračunavanje dijagrama usmerenosti mikrofonskog niza vrednosti svih koeficijenata w_n su jednake i iznose $1/M$. Vektor pozicija mikrofona u prostoru definisan je sledećim izrazom:

$$\vec{p}_n = \begin{bmatrix} p_x & p_y & p_z \end{bmatrix}, \quad 2.2$$

gde su p_x , p_y i p_z koordinate u Dekartovom koordinatnom sistemu. Talasni broj definisan je sledećim izrazom:

$$\vec{k} = k\vec{a} = \frac{\omega}{c}\vec{a}, \quad 2.3$$

gde je \vec{a} vektor koji definiše pravac za koji se vrši izračunavanje dijagrama usmerenosti. Vektor \vec{a} je jednoznačno određen azimutnim uglom ϕ i elevacionim uglom θ , koji se definišu u odnosu na centar mikrofonskog niza. Vektor \vec{a} definisan je sledećim izrazom:

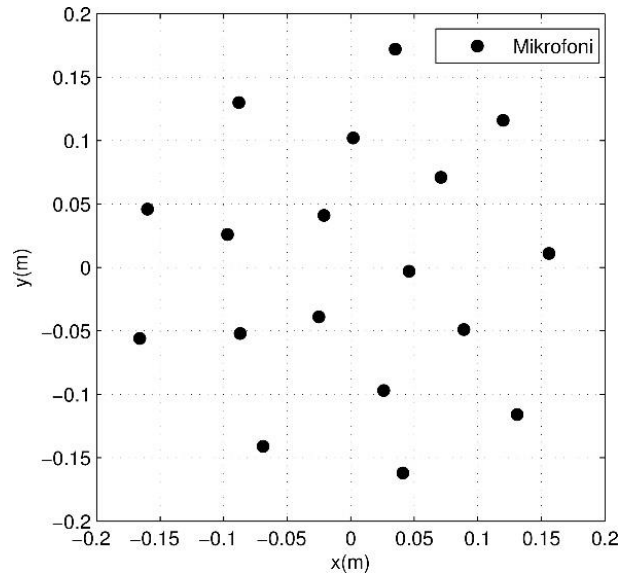
$$\vec{a} = \left[-\sin(\theta)\cos(\phi)\vec{k}_x \quad -\sin(\theta)\sin(\phi)\vec{k}_y \quad -\cos(\theta)\vec{k}_z \right]^T, \quad 2.4$$

gde k_x , k_y i k_z predstavljaju jedinične vektore za x , y i z pravac, respektivno, a T označava operaciju transponovanja matrice. Na osnovu izraza 2.1 i 2.4 dijagram usmerenosti mikrofonskog niza može se izračunati na sledeći način:

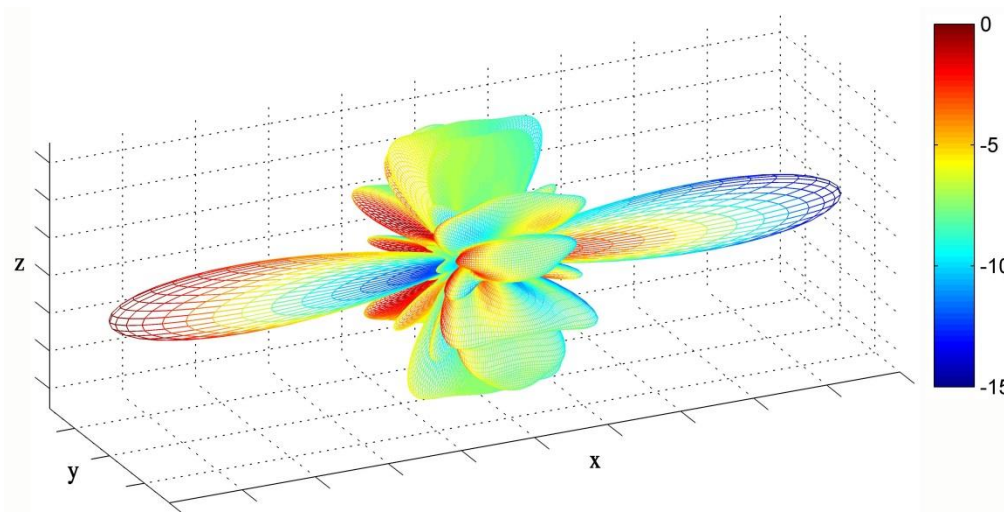
$$W(\phi, \theta) = \sum_{n=0}^M \frac{1}{M} \exp\left(-j\frac{\omega}{c} p_n \left[-\sin(\theta)\cos(\phi) \quad -\sin(\theta)\sin(\phi) \quad -\cos(\theta) \right]^T \right). \quad 2.5$$

Na osnovu poslednjeg izraza uočava se da je dijagram usmerenosti frekvencijski zavisna veličina, pa je za praktične aplikacije u kojima se koristi mikrofonski niz potrebno poznavanje izgleda dijagrama usmerenosti u frekvencijskom opsegu od interesa. Takođe, iz izraza 2.5 sledi da za fiksiranu frekvenciju dijagram usmerenosti mikrofonskog niza zavisi jedino od pozicije mikrofona u prostoru i broja mikrofona koji čine mikrofonski niz.

Na Slici 2.4 prikazan je raspored mikrofona jednog neregularnog planarnog mikrofonskog niza sa 18 mikrofona [22], koji će u nastavku ovog poglavlja biti korišćen za objašnjenje pojmova. Dijagram usmerenosti planarnog neregularnog mikrofonskog niza sa Slike 2.4, izračunat na osnovu izraza 2.5 za frekvenciju 4 kHz, prikazan je na Slici 2.5. Dijagram usmerenosti prikazan je u Dekartovom koordinatnom sistemu. Na Slici 2.5 bojama je predstavljena vrednost dijagrama usmerenosti izražena u dB za određeni pravac. Tople boje na dijagramu usmerenosti predstavljaju veće vrednosti.



Slika 2.4 Primer rasporeda mikrofona neregularnog planarnog mikrofonskog niza sa 18 mikrofona

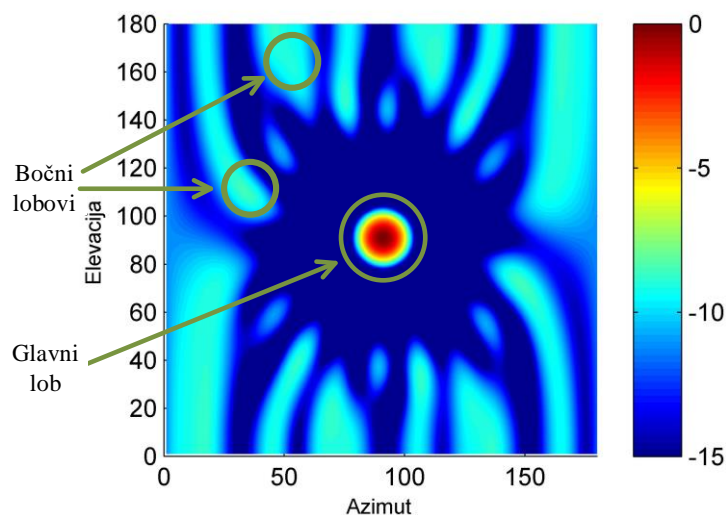


Slika 2.5 Dijagram usmerenosti planarnog neregularnog mikrofonskog niza

Planarni mikrofonski niz na slici nalazi se u ravni xy i dijagram usmerenosti je simetričan oko ove ravani. Simetričnost dijagrama usmerenosti oko ravni mikrofonskog niza posledica je neodređenosti svojstvene planarnim nizovima [15]. Ona se ogleda u tome što ovakav mikrofonski niz ne može da odredi da li se zvučni izvor nalazi ispred ili njega. Neodređenost dijagrama usmerenosti kod linijskog (1D) mikrofonskog niza je potpuna, odnosno može se odrediti samo pod kojim azimutnim uglom zvučni talas

nailazi na niz [23]. Samo prostorni mikrofonski niz (3D) nema neodređenost pri određivanju pravca nailaska zvuka [10].

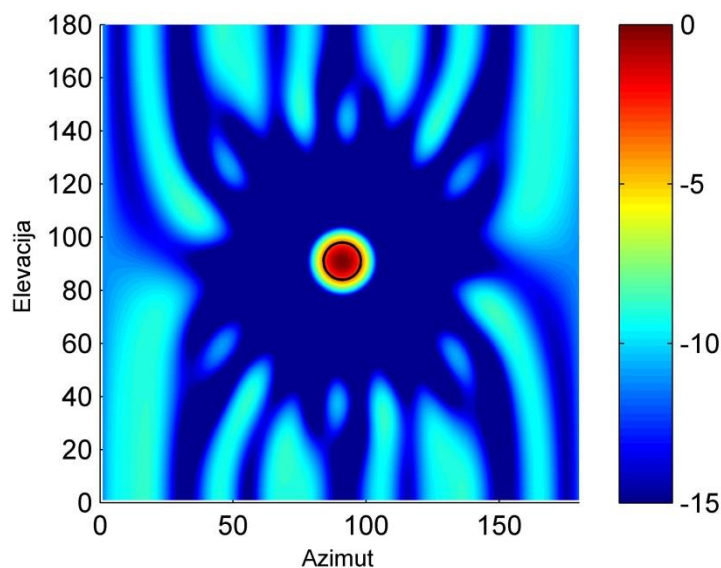
Na dijagramu usmerenosti sa Slike 2.5 uočavaju se lokalni maksimumi koji predstavljaju prostorne uglove za koje mikrofonski niz ima veću „osetljivost“. Globalni maksimum dijagrama usmerenosti naziva se glavni lob (*main lobes*) mikrofonskog niza, dok se lokalni maksimumi nazivaju bočni ili sporedni lobovi (*side lobe*) [12]. Širina glavnog loba i veličina bočnih lobova dijagrama usmerenosti predstavljaju dve najvažnije osobine mikrofonskog niza sa stanovišta praktičnih aplikacija. Širina glavnog loba određuje prostornu rezoluciju sa kojom se mogu određivati lokacije zvučnih izvora, dok veličina bočnih lobova određuje prisutnost lažnih zvučnih izvora (*ghost source*) koji se pojavljuju prilikom lokalizacije stvarnih zvučnih izvora [11]. Na Slici 2.6 prikazan je dijagram usmerenosti mikrofonskog niza kao funkcija azimuta i elevacije na kome su označeni glavni lob i najveći bočni lobovi. Ovaj dijagram usmerenosti ekvivalentan je dijagramu usmerenosti sa Slike 2.5, s tim što je prikaz ograničen na prostorne uglove po azimutu $\phi=[0\ 180]$ i po elevaciji $\theta=[0\ 180]$. Ovakav način prikazivanja dijagrama usmerenosti planarnog mikrofonskog niza najčešće je korišćen u literaturi, jer je poznato da je kod planarnog mikrofonskog niza dijagram usmerenosti simetričan za prostorne uglove $\phi=[180\ 360]$ i $\theta=[180\ 360]$.



Slika 2.6 Dijagram usmerenosti planarnog mikrofonskog niza

2.3.1 Prostorna rezolucija mikrofonskog niza

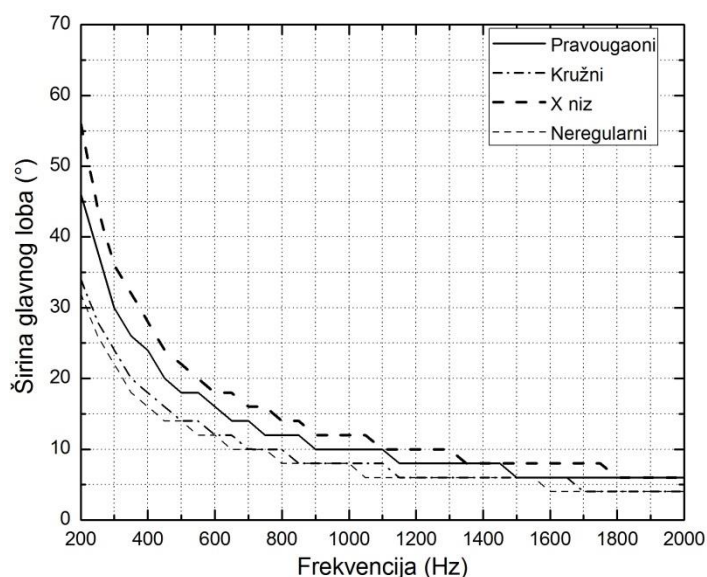
Sa stanovišta praktičnih aplikacija za lokalizaciju zvučnih izvora u prostoru pomoću mikrofonskog niza važno je poznavati širinu glavnog loba (*beamwidth*) dijagrama usmerenosti. Širina glavnog loba dijagrama usmerenosti određuje prostornu rezoluciju koja se može postići, odnosno definiše selektivnost mikrofonskog niza za određeni prostorni pravac. Prilikom dizajna mikrofonskog niza važno je odabrati pozicije mikrofona u prostoru tako da širina glavnog loba bude što je moguće manja. Širina glavnog loba može se odrediti po više kriterijuma, kao što su kriterijum prve nule, kriterijum 3 dB granične učestanosti, itd [24]. U ovom radu je za određivanje širine glavnog loba odabran kriterijum 3 dB. Ovaj kriterijum podrazumeva vrednost ugla za koji usmerenost mikrofonskog niza opadne za 3 dB u odnosu na maksimalnu vrednost dijagrama usmerenosti, odnosno na osu glavnog loba. Na Slici 2.7 prikazan je dijagram usmerenosti planarnog mikrofonskog niza sa Slike 2.4, a crnom bojom označena je širina bočnog loba određenog po kriterijumu 3 dB.



Slika 2.7 Širina glavnog loba mikrofonskog niza po kriterijumu 3 dB

Dijagram usmerenosti je frekvencijski zavisian, odakle sledi da je i širina glavnog loba mikrofonskog niza takođe frekvencijski zavisna veličina. Na Slici 2.8 prikazana je frekvencijska zavisnost širine glavnog loba u frekvencijskom opsegu od 200 Hz do

2000 Hz za četiri planarna mikrofoniska niza sa Slike 2.2. Prikazani grafici izračunati su sa frekvenzijskom rezolucijom od 50 Hz. Za analizirane mikrofoniske nizove izračunat je dijagram usmerenosti za svaku frekvenciju od interesa, a nakon toga je izračunata širina glavnog loba po kriterijumu 3 dB. Sa slike se vidi da širina glavnog loba mikrofoniskog niza zavisi od rasporeda mikrofona u prostoru, odnosno od geometrije mikrofoniskog niza. Analizirani mikrofoniski nizovi imaju isti broj mikrofona i svi sem neregularnog niza imaju približno isti otvor niza. Najmanju širinu glavnog loba u celom frekvenzijskom opsegu ima planarni neregularni mikrofoniski niz. Za dijagram je odabran niz koji ima nešto veći otvor, a geometrija mu je optimizovana tako da se ostvari što manja širina glavnog loba. Na osnovu toga se zaključuje da širina glavnog loba zavisi od otvora mikrofoniskog niza [11]. Broj mikrofona u mikrofoniskom nizu takođe određuje širinu glavnog loba dijagrama usmerenosti [10]. Kod svih mikrofoniskih nizova ona se smanjuje sa porastom frekvencije, što je posledica pojave povećanja usmerenosti sa smanjivanjem talasne dužine zvučnog talasa.



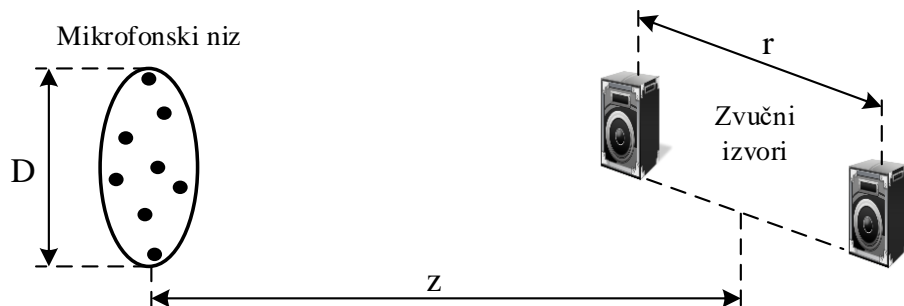
Slika 2.8 Frekvenzijska zavisnost širine glavnog loba za planarne mikrofoniske nizove sa Slike 2.2

Sa stanovišta upotrebe mikrofoniskog niza u lokalizaciji zvučnih izvora važna karakteristika je mogućnost da se odredi lokacija zvučnih izvora koji se nalaze na međusobno bliskom rastojanju i rade istovremeno. Minimalno rastojanje između

zvučnih izvora za koje je moguće detektovati njihove pojedinačne lokacije zavisi od širine glavnog loba, ali i od drugih parametara. To su rastojanje od mikrofonskog niza do ravni u kojoj se nalaze izvori i talasna dužina zvuka, odnosno frekvencija. Minimalno rastojanje između izvora koje je moguće prostorno razdvojiti naziva se Rejljevo rastojanje [12] i određuje se na osnovu relacije 2.6.

$$r = \frac{\alpha \cdot z \cdot c}{D \cdot f} \text{ [m]}, \quad 2.6$$

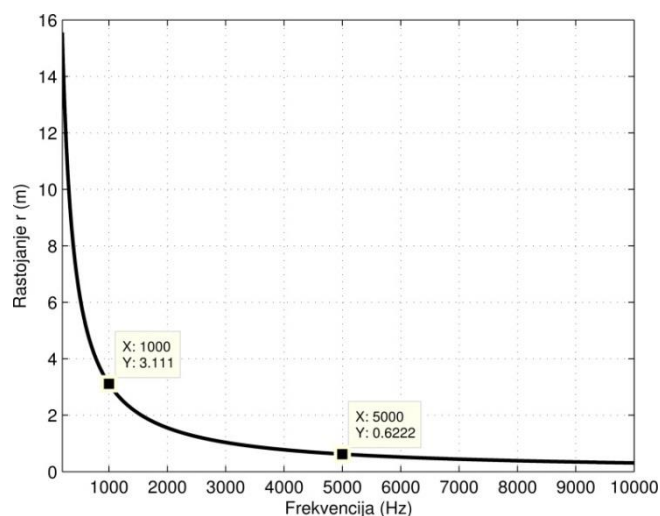
gde je α Rejljev faktor, koji je za linijske nizove jednak 1, a za planarne nizove ima vrednost 1.22 [11]. Na Slici 2.9 prikazan je scenario sa dva zvučna izvora čija se lokacija određuje sa relevantnim oznakama. Rastojanje između mikrofonskog niza i zvučnih izvora označeno je sa z , dok D predstavlja otvor mikrofonskog niza. Uticaj širine glavnog loba na minimalno rastojanje sadržan je u parametru D koji predstavlja otvor mikrofonskog niza.



Slika 2.9 Rejljevo rastojanje između zvučnih izvora

Na osnovu relacije 2.6 uočava se da je Rejljevo rastojanje obrnuto proporcionalno sa frekvencijom i otvorom mikrofonskog niza, što znači da je za prostorno razdvajanje zvučnih izvora na niskim frekvencijama potrebno koristiti mikrofonski niz sa velikim otvorom niza. Takođe, može se uočiti da se sa udaljavanjem mikrofonskog niza od zvučnih izvora smanjuje prostorna rezolucija, odnosno smanjuje se mogućnost da se pomoću mikrofonskog niza razdvoje zvučni izvori na bliskom rastojanju.

Kao ilustracija je na Slici 2.10 prikazana vrednost minimalnog rastojanja na kom je moguće izvršiti prostorno razdvajanje zvučnih izvora pomoću mikrofonskog niza sa Slike 2.4. Pretpostavljeno je da se mikrofonski niz sa otvorom od $D = 0.4$ m nalazi na rastojanju $z = 2$ m od ravni u kojoj se nalaze zvučni izvori. Na slici su označene vrednosti $f = 1000$ Hz i $f = 5000$ Hz kao ilustracija smanjenja minimalnog prostornog rastojanja sa frekvencijom.



Slika 2.10 Frekvencijska zavisnost Rejljevog rastojanja za mikrofonski niz sa Slike 2.4

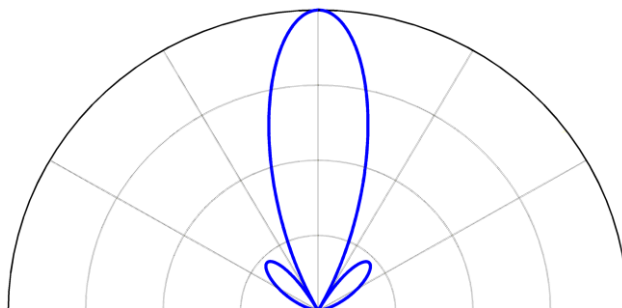
Izraz 2.6 izveden je pod pretpostavkom da je osa koja polazi iz centra mikrofonskog niza upravna na ravan u kojoj se nalaze zvučni izvori. Kada ravan u kojoj se nalaze zvučni izvori zaklapa drugačiji ugao od ovog, Rejljevo rastojanje se izračunava na sledeći način [11]:

$$r(\theta) = \frac{\alpha \cdot z \cdot c}{\cos^3(\beta) \cdot f} \text{ [m]}, \quad 2.7$$

gde je β ugao između ose mikrofonskog niza i ravni u kojoj se nalaze zvučni izvori. Na osnovu ovog izraza proizilazi da se s povećavanjem vrednosti ugla β povećava i minimalno rastojanje r . To znači da se prostorna rezolucija mikrofonskog niza smanjuje ukoliko se zvučni izvori nalaze pod određenim uglom u odnosu na osu niza u odnosu na situaciju kada se izvori nalaze u osi mikrofonskog niza.

2.3.2 Bočni lobovi mikrofonskog niza

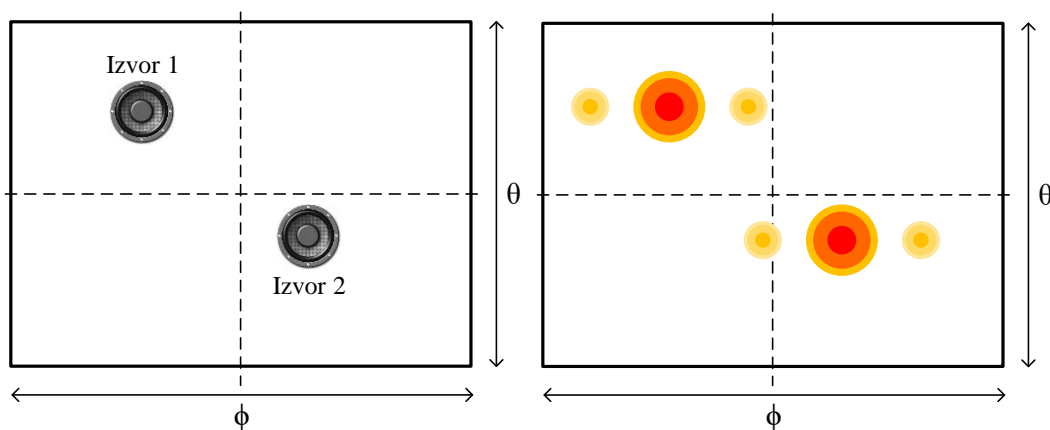
Drugi važan parametar mikrofonskih nizova u praktičnim primenama je veličina bočnih lobova u dijagramu usmerenosti. Veličinu i raspored bočnih lobova određuje broj mikrofona u mikrofonskom nizu i njihov raspored u prostoru, to jest geometrija niza. Prilikom lokalizacije zvučnih izvora bočni lobovi imaju za posledicu pojavu lažnih izvora, što može dovesti do pogrešnih zaključaka o zvučnom polju koje se analizira. Zbog toga je cilj da se podešavanjem pozicija mikrofona u nizu dobije što manji nivo bočnih lobova. Takođe, u prethodnom poglavlju je prikazano da širina glavnog loba mikrofonskog niza treba da bude što je moguće manja zbog bolje prostorne rezolucije. Ova dva zahteva nije moguće ispuniti u širem frekvencijskom opsegu. Da bi se postigla manja širina glavnog loba potreban je veliki otvor niza, odnosno udaljavanje mikrofona u prostoru. To za posledicu ima povećanje amplituda bočnih lobova na višim frekvencijama. Zbog toga se u praktičnim aplikacijama uvek traži kompromis između ova dva zahteva.



Slika 2.11 Dijagram usmerenosti mikrofonskog niza sa dva bočna loba

Da bi se objasnila uloga bočnih lobova u lokalizaciji zvučnih izvora na Slici 2.11 je prikazan horizontalni presek jednog sintetizovanog dijagrama usmerenosti. On nije dobijen na osnovu geometrije nekog stvarnog mikrofonskog niza, već je sintetizovan zbog jednostavnosti objašnjenja uticaja bočnih lobova. Vidi se da dijagram usmerenosti pored glavnog loba ima i dva bočna loba čije se ose nalaze pod azimutnim uglom od 45° u odnosu na osu glavnog loba. Princip je primenjiv i na stvarni dijagram usmerenosti mikrofonskog niza.

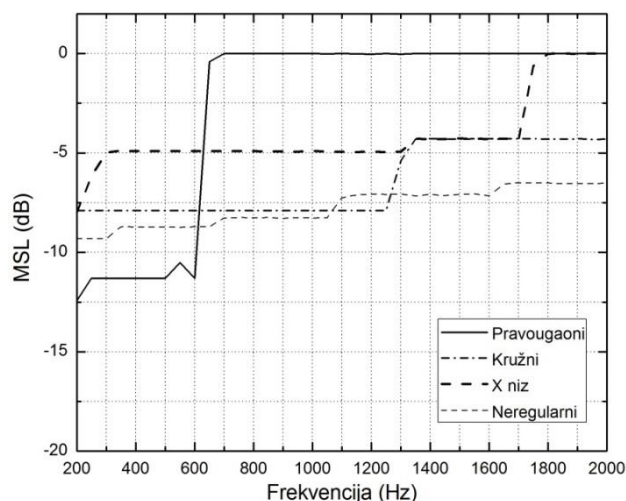
Na Slici 2.12 a) prikazana su dva zvučna izvora za koja se pretpostavlja da se nalaze na međusobnom rastojanju koje je veće od Rejljevog limita za analizirani mikrofonski niz. Izvori se nalaze unutar prostora određenog azimutnim uglom ϕ i elevacionim uglom θ . Ukoliko se pomoću hipotetičkog mikrofonskog niza sa Slike 2.11 vrši lokalizacija zvučnih izvora sa slike 2.12 a) rezultat lokalizacije će biti ne samo stvarne pozicije izvora, već i pozicije još nekoliko izvora koji ne postoje u realnosti. Na Slici 2.12 b) prikazan je rezultat takve lokalizacije. Ukoliko ne bi bilo poznato koliko izvora zaista postoji u prostoru, što je tipičan slučaj u praktičnim okolnostima, na osnovu Slike 2.12b) zaključilo bi se da postoji 6 zvučnih izvora. Svaki od bočnih lobova stvorio je po još dva zvučna izvora u rezultujućoj slici na osnovu jednog stvarnog izvora. Ovakva rezultatna slika zvučnog polja je pogrešna pa je zbog toga osnovni zahtev prilikom dizajna mikrofonskog niza smanjivanje prisustva i veličine bočnih lobova.



Slika 2.12 a) Zvučni izvori u prostoru, b) Rezultat lokalizacije pomoću mikrofonskog niza čiji je dijagram usmerenosti prikazan na Slici 2.11

Da bi se na jednostavan način moglo kvantifikovati prisustvo bočnih lobova u dijagramu usmerenosti mikrofonskog niza uveden je jednobrojni parametar MSL (*Maximum Sidelobe Level*), koji predstavlja odnos amplitude maksimalnog bočnog loba i amplitude glavnog loba [25]. Pošto se ovaj parametar uobičajeno izražava u dB njegova vrednost je uvek negativna. Maksimalna moguća vrednost je 0 dB, i ona se javlja kada bočni lob ima amplitudu jednaku amplitudi glavnog loba (*grating sidelobe*) [12]. Ovaj slučaj se javlja kod regularnih mikrofonskih nizova i sa stanovišta upotrebe

mikrofonskog niza u lokalizaciji izvora predstavlja najnepovoljniji slučaj. MSL kao jednobrojni parametar omogućava jednostavno poređenje različitih konfiguracija mikrofonskih nizova, što je značajno prilikom izbora njihove geometrije u praktičnim aplikacijama. Pošto oblik dijagrama usmerenosti mikrofonskog niza zavisi od frekvencije, sledi da je i MSL frekvencijski zavisni parametar.



Slika 2.13 Frekvencijska zavisnost parametra MSL za mikrofonске nizove sa Slike 2.2

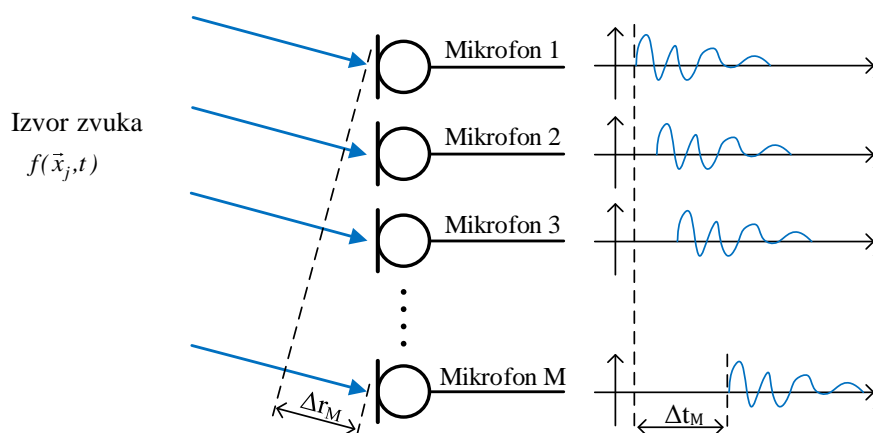
Na Slici 2.13 prikazana je frekvencijska zavisnost parametra MSL za četiri planarna mikrofonска niza sa Slike 2.2. Grafik je prikazan za frekvencijski opseg [200 2000] Hz, sa frekvencijskom rezolucijom od 50 Hz. Pravougaoni mikrofonски niz na frekvencijama većim od 700 Hz ima vrednost parametra MSL 0 dB, što je posledica ponovljenih rastojanja između mikrofona. Kružni mikrofonски niz ima najmanju vrednost MSL parametra od svih regularnih nizova koji su poređeni. X niz takođe ima pojavu jakih (*grating*) bočnih lobova, kao i pravougaoni mikrofonски niz, ali na frekvencijama višim od 1800 Hz. Neregularni mikrofonски niz ima najmanju vrednost maksimalnog bočnog loba u posmatranom frekvencijskom opsegu. Ovo je posledica toga što je kod ovog mikrofonskog niza izvršena optimizacija pozicija mikrofona sa ciljem da se smanji vrednosti bočnih lobova u posmatranom frekvencijskom opsegu.

2.4 Algoritmi za prostorno-vremensku obradu signala

Najčešća namena mikrofonskih nizova u praksi je određivanja pravca nailaska zvučnog talasa. U nastavku će biti prikazani princip na kome se to zasniva. Pored prikaza osnovnih algoritama koji se koriste za lokalizaciju zvučnih izvora u prostoru biće prikazani i napredniji algoritmi za prostorno-vremensku obradu signala pomoću kojih se dobija preciznija lokalizacija i omogućava tačnija analiza zvučnog polja.

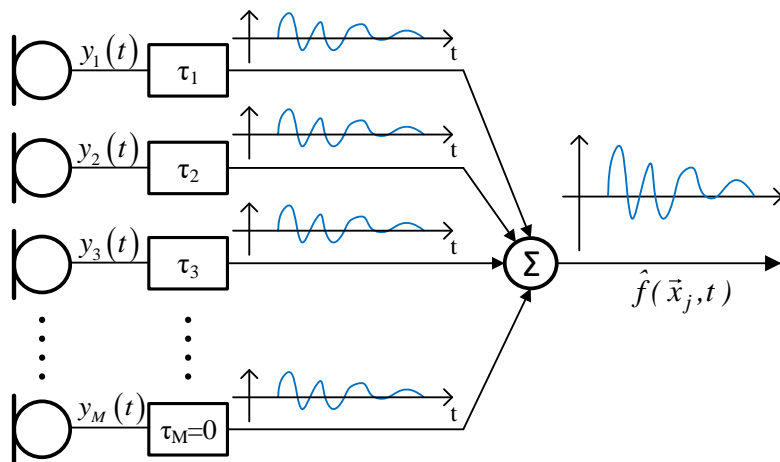
2.4.1 Delay and sum algoritam

Na Slici 2.14 prikazana je skica linijskog mikrofonskog niza koji se nalazi u dalekom zvučnom polju nekog zvučnog izvora. Za objašnjenje principa na kome se zasniva najjednostavniji algoritam za određivanje pravca nailaska zvuka, bez gubitka opštosti, izabran je linijski mikrofonski niz. Sa slike se vidi da talasni front nailazi na niz pod određenim uglom. Prostorna raspodeljenost mikrofona obezbeđuje da zvuk prvo stiže do mikrofona 1. Do mikrofona M zvuk prelazi put koji je za Δr_M duži od puta koji zvuk prelazi do mikrofona 1. Usled putne razlike zvuka između pojedinih mikrofona na u njihovim signalima javlja se kašnjenje u vremenskom domenu. Za scenario sa Slike 2.14 najveću vrednost kašnjenja u odnosu na ostale mikrofone ima signal mikrofona M .



Slika 2.14 Vremenska kašnjenja na mikrofonskom nizu

Vremenska kašnjenja signala sa pojedinačnih mikrofona uzrok su njihovih faznih razlika. Ukoliko je geometrija mikrofonskog niza poznata može se na osnovu faznih razlika između signala na mikrofonskom nizu odrediti iz kog pravca nailazi zvuk na osu mikrofonskog niza. Na osnovu geometrije i dobijenih faznih razlika moguće je izračunati fazni pomak τ koji je potrebno uneti u signal sa svakog mikrofona tako da svi signali budu u fazi. Uvođenje faznih pomaka odgovara vremenskom kašnjenju signala. Signal sa mikrofona do kog je zvučni talas prvo stigao imaće najveću vrednost unetog kašnjenja, dok se signal sa najudaljenijeg mikrofona od izvora (mikrofona M) ne kasni. Cilj ovog procesiranja je da se svi signali dovedu u fazu sa signalom sa najudaljenijeg mikrofona od zvučnog izvora. Nakon postizanja da su svi signali na mikrofonskom nizu u fazi može se izvršiti njihovo sabiranje. Tako dobijen signal ima maksimalnu amplitudu koju je moguće ostvariti. Prethodno opisani princip, gde se uvodi kašnjenje signala da bi se postigao isti fazni stav između njih, a zatim vrši njihovo sabiranje, poznat je u literaturi pod nazivom *delay and sum* (DaS) i principski je prikazan na Slici 2.15 [24].

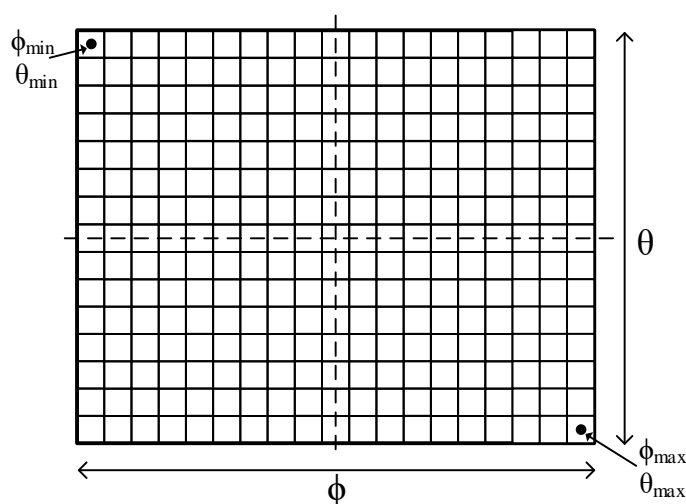


Slika 2.15 Princip algoritma *delay and sum*

Algoritam *delay and sum* se može primeniti i za planarne mikrofonske nizove, tako što se umesto jednog ugla koji određuje pravac u kom se nalazi zvučni izvor uvedu dva prostorna ugla, azimutni ϕ i elevacioni θ . Na osnovu poznate geometrije mikrofonskog niza i pretpostavljenog pravca u kom se nalazi izvor moguće je odrediti kolika fazna

kašnjenja je potrebno uneti u signale sa pojedinačnih mikrofona, tako da signali budu u fazi. Nakon sabiranja svih signala može se izračunati njegova energija.

Ponavljanjem ovog postupka za sve pravce od interesa moguće je izračunati koliko zvučne energije dolazi iz kog pravca i tako dobiti „sliku“ zvučnog polja u prostoru. Na Slici 2.16 principski je prikazana podela prostora u kom se određuje zvučna energija. Prostor je definisan azimutnim i elevacionim uglovima. Veličina prostora, kao i rastojanje između susednih tačaka u kojima se računa energija zavise od konkretne aplikacije.



Slika 2.16 Ravan u kojoj se određuje „slika“ energije zvučnog polja

Algoritam *delay and sum* je jednostavan zbog toga što je potrebno poznavati samo geometriju mikrofonskog niza, uvesti odgovarajuća kašnjenja signala i njihovo sabiranje. Zbog svoje jednostavnosti ovaj algoritam našao je široku primenu i gotovo je standardni algoritam za prostorno-vremensku obradu signala sa mikrofonskog niza u komercijalno dostupnim rešenjima na tržištu. Međutim, tako dobijen rezultat direktno zavisi od karakteristika mikrofonskog niza, odnosno od prostorne rezolucije i veličine bočnih lobova. U ovom poglavlju objašnjeni su uticaji ovih parametara na rezultat lokalizacije na osnovu čega se može zaključiti da se pomoću ovog algoritma neće uvek dobiti precizan rezultat lokalizacije. Bez obzira na to, zbog svoje jednostavnosti ovaj

algoritam se koristi u brojnim praktičnim aplikacijama za preliminarna merenja u kojima preciznost same lokalizacije nije toliko važna.

2.4.2 Konvencionalni *beamforming*

Konvencionalni *beamforming* (CB) [5] realizovan je u frekvencijskom domenu i po načinu funkcionisanja analogan je *Delay and sum* algoritmu u vremenskom domenu. Razlika između ova dva algoritma je to što CB algoritam omogućava lokalizaciju zvučnih izvora u prostoru po frekvencijskim opsezima, dok se pomoću algoritma *DaS* dobija širokopojasan rezultat. Mogućnost lokalizacije zvučnih izvora u određenim frekvencijskim opsezima važna je u raznim praktičnim aplikacijama.

Početni korak u konvencionalnom *beamforming* algoritmu je izračunavanje CSM (*Cross Spectral Matrix*) [26], [27], odnosno njenih elemenata, na osnovu signala dobijenih sa mikrofonskog niza. Signali na mikrofonskom nizu predstavljaju vremensku promenu zvučnog pritiska $p_m(t)$, gde je m redni broj mikrofona. Osnovu za izračunavanje CSM matrice predstavljaju spektri signala dobijeni Furijeovom transformacijom $P_m(f,T)$, gde T predstavlja trajanje jednog vremenskog bloka nad kojim se vrši Furijeova transformacija, dok f predstavlja frekvenciju. Element CSM matrice za par mikrofona označenih sa m i m' dobija se na osnovu sledećeg izraza:

$$G_{mm'}(f) = \frac{2}{Kw_s T} \sum_{k=1}^K [P_{mk}^*(f,T) \cdot P_{m'k}(f,T)]. \quad 2.8$$

U prethodnom izrazu K predstavlja broj blokova koji se koristi za usrednjavanje prilikom računanja spektra, odnosno ukupna dužina signala na osnovu koga se računaju spektri za sve signale sa mikrofonskog niza je KT . w_s predstavlja konstantu za odgovarajuću prozorsku funkciju. Ukoliko se koristi pravougaona prozorska funkcija parametar w_s ima vrednost 1, dok se u slučaju ostalih prozorskih funkcija vrednost razlikuje od 1. Element CSM matrice $G_{mm'}(f,T)$ predstavlja proizvod spektara sa dva mikrofona, od kojih je jedan konjugovano kompleksan, na diskretnoj frekvenciji f , sa frekvencijskim opsegom Δf . Frekvencijski opseg definisan je sledećim izrazom:

$$\Delta f = \frac{1}{T} \text{ (Hz)}. \quad 2.9$$

Celokupna CSM matrica za m_0 mikrofona u mikrofonskom nizu definiše se na sledeći način:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1m_0} \\ \vdots & G_{22} & \cdots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ G_{m_01} & & & G_{m_0m_0} \end{bmatrix}, \quad 2.10$$

gde su elementi matrice \mathbf{G} definisani izrazom za $G_{mm'}(f)$.

Da bi se odredila energija koja nailazi iz određenog pravca pored izračunate CSM matrice potrebno je izračunati i *steering* vektor koji će obezbediti korekciju amplitudskih i faznih razlika za svaki od mikrofona u mikrofonskom nizu. Za mikrofona m i za izabrani pravac *steering* vektor izračunava se na sledeći način [5]:

$$e_m = \frac{r_m}{r_c} \exp(j2\pi f \tau_m), \quad 2.11$$

gde je f frekvencija, r_m rastojanje mikrofona m od ravni skeniranja u kojoj se nalaze zvučni izvori, a r_c predstavlja rastojanje referentne tačke na mikrofonskom nizu do ravni skeniranja. Kao referentna tačka na mikrofonskom nizu uzima se njegov centar čije su koordinate u Dekartovom koordinatnom sistemu $(x,y) = (0,0)$. Rastojanje od ravni skeniranja do centra mikrofonskog niza se zadaje, dok se rastojanja do pojedinačnih mikrofona izračunavaju na osnovu poznate geometrije mikrofonskog niza i zadatog rastojanja r_c . Parametar τ_m predstavlja vreme koje je potrebno zvučnom talasu da stigne do mikrofona m i računa se na sledeći način:

$$\tau_m = \frac{r_m}{c}, \quad 2.12$$

gde je c brzina zvuka u vazduhu. Kada se za svaki mikrofona izračuna *steering* vektor dobija se niz *steering* vektora koji ima dužinu jednaku broju mikrofona u mikrofonskom nizu:

$$\hat{e} = [e_1 \quad e_2 \quad \cdots \quad e_{m_0}]. \quad 2.13$$

Vrednost energije iz određenog prostornog ugla definiše se na sledeći način:

$$Y(\hat{e}) = \frac{\hat{e}^T G \hat{e}}{m_0^2}, \quad 2.14$$

gde T predstavlja operaciju konjugovanog transponovanja matrice. Kada se matrica Y izračuna za sve prostorne uglove od interesa dobija se “slika” zvučne energije skeniranog dela prostora. Na osnovu vrednosti matrice Y može se izvršiti analiza zvučnog polja, odnosno utvrditi gde se nalaze zvučni izvori u prostoru. Rezultat CB algoritma, kao i *DaS* algoritma, zavisi od karakteristika korišćenog mikrofonskog niza i ne predstavlja uvek stvarnu raspodelu zvučne energije u prostoru koji je analiziran. Bez obzira na to, ovaj algoritam ima veliku primenu zbog svoje jednostavnosti i mogućnosti lokalizacije u izabranim frekvencijskim opsezima. Takođe, CB algoritam predstavlja prvi korak u gotovo svim naprednim algoritmima iz literature koji se koriste za određivanje preciznije prostorne raspodele zvučne energije u prostoru od interesa.

2.4.3 Dekonvolucioni algoritmi

CSM matrica izračunata na osnovu signala sa mikrofonskog niza predstavlja osnovu za CB algoritam, opisan u prethodnom potpoglavlju. Ukoliko se pretpostavi da postoji samo jedan zvučni izvor u ravni skeniranja na poziciji n CSM matrica može se zapisati na sledeći način [5]:

$$G_{n_{\text{mod}}} = X_n \begin{bmatrix} (e_1^{-1})^* e_1^{-1} & (e_1^{-1})^* e_2^{-1} & \cdots & (e_1^{-1})^* e_{m_0}^{-1} \\ (e_2^{-1})^* e_1^{-1} & (e_2^{-1})^* e_2^{-1} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ (e_2^{-1})^* e_1^{-1} & & & (e_1^{-1})^* e_{m_0}^{-1} \end{bmatrix}_n, \quad 2.15$$

gde je X_n energija zvučnog pritiska na svakom od mikrofona za odabrani frekvencijski opseg, a e je *steering* vektor. Ukoliko se pretpostavi da u ravni skeniranja postoji N statistički nezavisnih izvora ukupna CSM matrica ima sledeći oblik:

$$G_{\text{mod}} = \sum_n G_{n_{\text{mod}}}. \quad 2.16$$

Kada se u jednačinu za izračunavanje matrice Y , koja predstavlja rezultat lokalizacije, uvrsti prethodna jednačina CSM matrice za jedan izvor dobijaju se sledeće jednačine:

$$Y_{n_{\text{mod}}}(\hat{e}) = \left[\frac{\hat{e}^T G_{\text{mod}} \hat{e}}{m_0^2} \right]_n, \quad 2.17$$

$$Y_{n_{\text{mod}}}(\hat{e}) = \frac{\hat{e}^T \sum_{n'} X_{n'} \left[\right]_{n'} \hat{e}}{m_0^2} = \sum_{n'} \frac{\hat{e}^T \left[\right]_{n'} \hat{e}}{m_0^2} X_{n'},$$

gde je u uglastim zagradama matrica *steering* vektora iz izraza 2.11. Poslednja jednačina može se zapisati u sledećem obliku:

$$Y_{n_{\text{mod}}}(\hat{e}) = \sum_{n'} A_{n'} X_{n'}, \quad 2.18$$

gde je:

$$A_{n'} = \frac{\hat{e}^T \left[\right]_{n'} \hat{e}}{m_0^2}. \quad 2.19$$

Kada se izraz 2.17 zapiše matrično dobija se sledeći izraz:

$$AX = Y, \quad 2.20$$

gde matrice A , X i Y sadrže članove $A_{n'}$, $X_{n'}$ i $Y_{n'}$, respektivno. Prethodni izraz definiše problem određivanja stvarne prostorne raspodele zvučne energije u ravni skeniranja. Matrica X predstavlja stvarnu rasodelu koju je potrebno odrediti, matrica A predstavlja uticaj mikrofonskog niza, dok Y matrica predstavlja rezultat lokalizacije pomoću CB algoritma. Iz prethodnog izraza se može zaključiti da u konačnom rezultatu lokalizacije pomoću algoritma CB figurišu ne samo energije stvarnih zvučnih izvora, već i karakteristike mikrofonskog niza. Da bi konačan rezultat lokalizacije sadržao realnu raspodelu zvučnog polja potrebno je eliminisati uticaj mikrofonskog niza, odnosno potrebno je da matrica Y postane jednaka matrici X . Problem iz izraza 2.20 može se rešiti na više načina i u nastavku je prikazano nekoliko algoritama koji rešavaju ovaj problem. Pošto je izraz 2.20 napisan u frekvencijskom domenu, a matrica Y se dobija množenjem matrice stvarnih energija izvora i matrice koja sadrži uticaj mikrofonskog niza, množenje u vremenskom domenu bi odgovaralo konvoluciji ove dve matrice. Zbog toga se algoritmi koji rešavaju problem definisan izrazom 2.20 nazivaju dekonvolucionni algoritmi.

2.4.4 DAMAS

Problem definisan izrazom 2.20 je sistem linearnih jednačina, a pošto je matrica A kvadratna problem bi se mogao jednostavno rešiti na sledeći način [5]:

$$X = A^{-1}Y. \quad 2.21$$

Međutim, pokazalo se da je pri lokalizaciji zvučnih izvora u prostoru samo za određen broj tačaka u ravni skeniranja i za određen region oko zvučnog izvora matrica A nesingularna. Koristeći *Singular Value Decomposition* (SVD) [28] metodologiju za utvrđivanje uslova za matricu A pokazano je da za tipične slučajeve u praksi rang matrice A ima malu vrednost. Rang matrice A definiše broj nezavisnih linearnih jednačina u izrazu 2.20. Mala vrednost ranga matrice znači da je broj mogućih rešenja veliki, pa je pronalaženje stvarne prostorne raspodele zvučnog polja u ravni skeniranja teško. Primenom ostalih tehnika kao što je konjugovani gradijentni metod [29] dobijaju se rezultati koji nemaju smisla, izuzev u okolnostima kada je broj postojećih zvučnih izvora mali. Koristeći se pretpostavkom da stvarni izvori X_n mogu imati samo pozitivne vrednosti zvučne energije, može se primeniti jednostavan iterativni postupak da bi se došlo do stvarne prostorne raspodele zvučne energije u ravni skeniranja. Jedna linearna komponenta matrice jednačine 2.20 može se napisati kao:

$$A_{n1}X_1 + A_{n2}X_2 + \dots + A_{nm}X_m + \dots + A_{nN}X_N = Y_n. \quad 2.22$$

Ako je $A_{nn}=1$, prethodni izraz može se zapisati kao:

$$X_n = Y_n - \left[\sum_{n'=1}^{n-1} A_{nn'}X_{n'} + \sum_{n'=n+1}^N A_{nn'}X_{n'} \right]. \quad 2.23$$

Jednačine pomoću kojih se dobija raspodela zvučnih izvora X_n za sve tačke n u ravni skeniranja između 1 i N za svaku iteraciju (i) date su sledećim izrazima:

$$X_1^{(i)} = Y_1 - \left[0 + \sum_{n'=1+1}^N A_{1n'}X_{n'}^{(i-1)} \right], \quad 2.24$$

$$X_n^{(i)} = Y_n - \left[\sum_{n'=1}^{n-1} A_{nn'}X_{n'}^{(i)} + \sum_{n'=n+1}^N A_{nn'}X_{n'}^{(i-1)} \right],$$

$$X_N^{(i)} = Y_N - \left[\sum_{n'=1+1}^N A_{nn'} X_{n'}^{(i)} + 0 \right].$$

Za prvu iteraciju ($i=1$) početne vrednosti za X_n i Y_n mogu biti izabrane proizvoljno, jer izbor vrednosti utiče samo na brzinu konvergencije postupka, ali ne i na konačan rezultat postupka. Ukoliko se u iterativnom postupku pojave negativne vrednosti X_n , potrebno je te vrednosti zameniti nulama. Jednačine date u 2.24 definišu algoritam koji se naziva DAMAS (*Deconvolution Approach for the Mapping of Acoustic Sources*) [5]. Brzina konvergencije algoritma zavisi od izabranog broja tačaka u ravni skeniranja ali i od strukture zvučnog polja i karakteristika korišćenog mikrofonskog niza. U realnim aplikacijama broj postojećih zvučnih izvora može biti veliki, pa konačno rešenje problema zahteva veliki broj iteracija, što povećava računsku i vremensku kompleksnost ovakvog načina rešavanja problema.

2.4.5 DAMAS2

Zbog velikog broja računskih operacija i velikog broja iteracija koje su potrebne da bi se odredila prostorna raspodela zvučne energije u ravni skeniranja DAMAS algoritam zahteva veliko vreme izvršavanja. Matrica A , koja sadrži karakteristike mikrofonskog niza često ima velike dimenzije, pa vreme potrebno za dekonvoluciju, odnosno pronalaženje konačnog rešenja na PC računarima može biti i nekoliko dana. Zbog toga se pojavila potreba za razvojem algoritama koji bi se bazirali na DAMAS principu, a čije bi vreme izvršavanja bilo značajno smanjeno.

Problem 2.20 može se zapisati preko prostornih koordinata na sledeći način:

$$b(\vec{x}) = \int psf(\vec{x}, \vec{x}') q(\vec{x}') d\vec{x}', \quad 2.25$$

gde je b rezultat CB algoritma, q stvarna prostorna raspodela zvučnog polja, a psf *Point Spread Function* [30]. Psf funkcija predstavlja karakteristiku mikrofonskog niza i računa se pomoću geometrije mikrofonskog niza i pozicije izvora određene vektorom \vec{x}' . U algoritmu DAMAS2, koji predstavlja unapređenje DAMAS algoritma, koristi se prostorna Furijeova transformacija da bi se ubrzao postupak izračunavanja stvarne prostorne raspodele zvučnog polja. Zbog brzine izvračunavanja Furijeove transformacije i inverzne Furijeove transformacije algoritam DAMAS2 značajno brže

konvergira u odnosu na DAMAS algoritam [31]. Pretpostavka koja omogućava brzo izvršavanje DAMAS2 algoritma je prostorna invarijantnost psf funkcije. To znači da se može smatrati da psf funkcija ne zavisi od pozicije izvora u ravni skeniranja i da je približno istog oblika za sve hipotetičke izvore u ravni skeniranja. Algoritam se zasniva na upotrebi *Weiner* filtra [32] za dekonvoluciju i sadrži sledeće korake [30]:

1. Računanje $\tilde{p}(\vec{k}) = \text{FFT}[psf(\vec{x})]$, gde je \vec{k} prostorna frekvencija, a FFT prostorna Furijeova transformacija.
2. Računanje parametra $a = \sum_{x,y,z} |psf|$.
3. Postavljanje matrice rešenja za sve tačke u ravni skeniranja na vrednost $q(\vec{x}) = 0$.
4. Iterativno se izvršavaju sledeći koraci:
 - a) $\tilde{q}(\vec{k}) = \text{FFT}[q(\vec{x})]$.
 - b) Za svako \vec{k} vrši se skaliranje $\tilde{q}(\vec{k})$ sa faktorom $\exp(-k^2 / (2k_c^2))$, gde je k_c granična frekvencija iznad koje se vrši eliminacija visokofrekvencijskog šuma koji se može javiti pri računanju.
 - c) Računa se $\tilde{r}(\vec{k}) = \tilde{p}(\vec{k})\tilde{q}(\vec{k})$, za svako \vec{k} .
 - d) Računa se $\tilde{r}(\vec{x}) = \text{iFFT}[\tilde{r}(\vec{k})]$, gde je iFFT inverzna prostorna Furijeova transformacija.
 - e) Računa se $q(\vec{x}) \leftarrow q(\vec{x}) + |\tilde{b}(\vec{x}) - r(\vec{x})|/a$, za svako \vec{x} .
 - f) Zamena svih negativnih vrednosti $q(\vec{x})$ sa 0.

Prvi korak u DAMAS2 algoritmu je kao i kod svih algoritama iz grupe dekonvolucionih algoritama CB algoritam (Konvencionalni *beamforming*), a rezultat CB algoritma se u literaturi naziva i “prljava” mapa [31] jer sadrži uticaj mikrofonskog niza. Postupak se izvršava iterativno a broj iteracija određuje se empirijski jer zavisi od konkretnih okolnosti primene i korišćenog mikrofonskog niza.

2.4.6 CLEAN-SC

CLEAN-SC algoritam takođe pripada klasi dekonvolucionih algoritama koji rešava problem definisan izrazom 2.20. Eliminacija uticaja mikrofonskog niza iz rezultata algoritma vrši se na osnovu koherentnosti sadržaja bočnih lobova i glavnog loba mikrofonskog niza. Kao i kod DAMAS2 algoritma uticaj mikrofonskog niza opisuje se *psf* funkcijom, za koju se usvaja pretpostavka da je prostorno invarijantna za različite položaje izvora u ravni skeniranja. U nastavku je dat postupak izračunavanja prostorne raspodele zvučne energije po koracima [33].

- 1) Početni korak i kod ovog algoritma predstavlja izračunavanje „prljave“ mape pomoću CB algoritma, odnosno izračunava se raspodela zvučne energije za svaku tačku iz ravni skeniranja $\vec{\zeta}_j$ kao:

$$P_j^{(1)} = \mathbf{w}_j^* \bar{\mathbf{C}} \mathbf{w}_j, \quad 2.26$$

gde $\bar{\mathbf{C}}$ predstavlja CSM matricu iz koje je uklonjena glavna dijagonala, a \mathbf{w} *steering* vektori, a $*$ predstavlja konjugovano-kompleksnu transpoziciju niza. Definiše se matrica \mathbf{Q} koja predstavlja mapu iz koje je odstranjen uticaj mikrofonskog niza i u prvoj iteraciji se zadaje kao nula matrica. Definiše se „degradirana“ CSM matrica koja će se koristiti u daljem računanju, a u prvoj iteraciji definiše se kao:

$$\mathbf{D}^{(1)} = \mathbf{C}. \quad 2.27$$

- 2) Iterativno se izvršavaju sledeći koraci:

- a) U „prljavoj“ mapi iz prethodne iteracije određuje se lokacija maksimuma zvučne energije $\vec{\zeta}_{\max}^{(i)}$ i dobija vrednost maksimuma $P_{\max}^{(i-1)}$. U matrici \mathbf{Q} čuva se energija koja odgovara izvoru sa maksimalnom energijom $P_{\max}^{(i-1)}$ na sledeći način:

$$Q_j^{(i)} = P_{\max}^{(i-1)} 10^{-\lambda \left\| \zeta_j - \zeta_{\max}^{(i)} \right\|^2}, \quad 2.28$$

gde je λ parametar koji određuje širinu opsega, a $\| \cdot \|$ predstavlja normu između dva vektora u Dekartovom koordinatnom sistemu.

- b) Mapa zvučne energije koja se koristi za dalja izračunavanja u algoritmu dobija se na osnovu sledećeg izraza:

$$P_j^{(i)} = P_j^{(i-1)} - w_j^* \bar{G}^{(i)} w_j, \quad 2.29$$

gde je matricu \mathbf{G} potrebno izračunati tako da se nakon prethodnog izraza eliminiše najjači izvor iz prethodne iteracije.

- c) Matrica \mathbf{G} izračunava se na sledeći način:

$$\bar{\mathbf{G}}^{(i)} = P_{\max}^{(i-1)} \left(\mathbf{h}^{(i)} \mathbf{h}^{*(i)} - \mathbf{H}^{(i)} \right), \quad 2.30$$

gde se $\mathbf{H}^{(i)}$ definiše kao:

$$H_{mn}^{(i)} = \begin{cases} 0, & \text{za } (m, n) \in S, \\ h^{(i)} h^{*(i)}, & \text{za } (m, n) \notin S, \end{cases} \quad 2.31$$

gde je S skup prostornih uglova u kom se vrši lokalizacija. Nepoznati vektor $\mathbf{h}^{(i)}$ određuje se iterativno na osnovu sledećeg izraza:

$$\mathbf{h}^{(i)} = \frac{1}{\left(1 + w_{\max}^* \mathbf{H}^{(i)} w_{\max} \right)^{1/2}} \left(\frac{\bar{\mathbf{D}}^{(i-1)} w_{\max}^{(i)}}{w_{\max}^{(i-1)}} + \mathbf{H}^{(i)} w_{\max}^{(i)} \right). \quad 2.32$$

Izabrana početna vrednost nije važna jer utiče samo na konvergenciju rešenja $\mathbf{h}^{(i)}$.

- d) Računa se nova “degradirana” CSM matrica na osnovu sledećeg izraza:

$$D_j^{(i)} = D_j^{(i-1)} - P_{\max}^{(i-1)} \mathbf{h}^{(i)} \mathbf{h}^{*(i)}. \quad 2.33$$

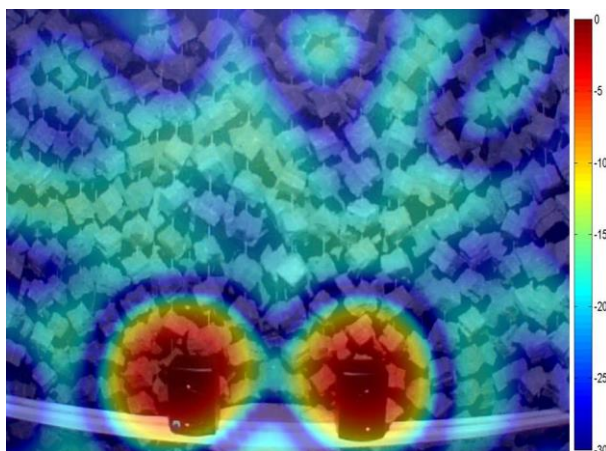
- 3) Nakon I iteracija dobija se mapa zvučne energije \mathbf{A} , iz koje je eliminisan uticaj mikrofonskog niz, koja predstavlja konačan rezultat algoritma. Konačan rezultat dobija se na osnovu sledećeg izraza:

$$A_j = \sum_{i=1}^I Q_j^{(i-1)} + P_j^{(I)}. \quad 2.34$$

2.4.7 Poređenje rezultata dobijenih različitim algoritmima za lokalizaciju

U ovom poglavlju prikazano je nekoliko algoritama za određivanje prostorne raspodele zvučnih izvora, odnosno lokalizaciju zvučnih izvora u prostoru. Svaki od njih ima neke prednosti, ali i nedostatke u odnosu na ostale algoritme. U nastavku će biti upoređeni rezultati lokalizacije zvučnih izvora u jednom realnom eksperimentu dobijeni pomoću CB algoritma, CLEAN-SC algoritma i DAMAS2 algoritma.

Eksperiment je realizovan u anehoičnoj prostoriji („gluva soba“) sa dva identična zvučnika koji emituju dve nekoherentne MLS (*Maximum Length Sequence*) sekvence [34]. Eksperiment je izveden u anehoičnim uslovima kako bi se sa sigurnošću moglo tvrditi gde se nalaze zvučni izvori. Sve površine anehoične prostorije akustički su obrađene apsorpcionim materijalom, tako da u prostoriji nema pojave refleksija, odnosno ne postoje dodatni izvori zvuka koji bi se mogli javiti usled refleksija. Zvučnici se nalaze na međusobnom rastojanju 0.5 m i na rastojanju 1.5 m od ravni mikrofonskog niza. Za lokalizaciju zvučnih izvora korišćen je mikrofonski niz sa Slike 2.4. Da bi se lakše analizirao rezultat lokalizacije prostor u kom se vrši lokalizacija zabeležen je video kamerom. Nakon toga rezultat algoritama mapiran je preko video sekvence, a nivo zvuka kodovan je bojama. Svi grafici prikazani su sa dinamičkim opsegom nivoa zvuka od 30 dB. Lokalizacija je izvršena na frekvenciji 5 kHz, sa frekvencijskim opsegom od 50 Hz.



Slika 2.17 Rezultat lokalizacije pomoću algoritma CB

Na Slici 2.17 prikazan je rezultat lokalizacije pomoću algoritma CB. Sa slike se vidi da maksimalne vrednosti nivoa zvuka odgovaraju položaju zvučnika. Upotrebom ovog algoritma relativni odnos zvučnih energija dva zvučna izvora je očuvan. Međutim, postoji izvesna koncentracija zvučne energije i u drugim tačkama prostora. Ova energija nije nastala kao posledica delovanja stvarnih izvora, već je posledica uticaja mikrofonskog niza koji je korišćen, odnosno njegovih bočnih lobova.

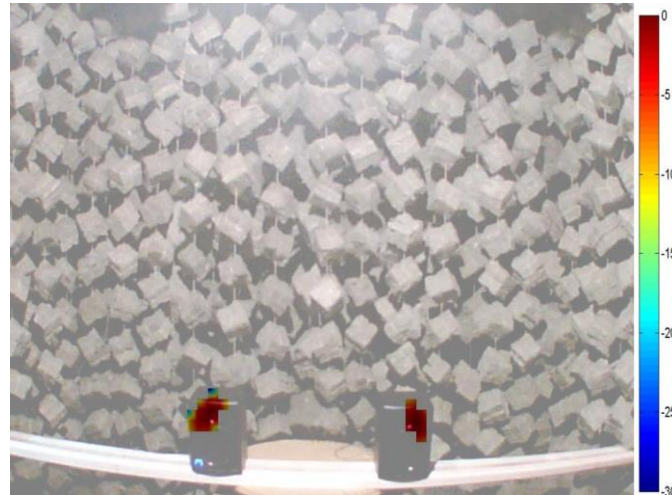


Slika 2.18 Rezultat lokalizacije pomoću algoritma CLEAN-SC

Na Slici 2.18 prikazan je rezultat lokalizacije pomoću CLEAN-SC algoritma. Maksimalne vrednosti zvučne energije odgovaraju pozicijama zvučnika u prostoru i relativni odnos energija zvučnih izvora je očuvan. Za razliku od rezultata dobijenog pomoću CB algoritma, kod ovog rezultata ne postoji energija koja dolazi iz ostalih tačaka prostora. Dobijeni rezultat pokazuje da je uticaj mikrofonskog niza eliminisan iz konačnog rezultata i da dobijena mapa predstavlja stvarnu prostornu raspodelu zvučne energije u skeniranom prostoru.

Na Slici 2.19 prikazan je rezultat lokalizacije pomoću DAMAS2 algoritma. Kao i kod rezultata dobijenog pomoću CLEAN-SC algoritma maksimalna lokalizovana zvučna energija odgovara položaju zvučnika. Takođe, u ostatku skeniranog prostora ne postoji zvučna energija i očuvan je relativni odnos energija pojedinačnih izvora. Na osnovu

toga zaključuje se da je i kod ovog algoritma za prostorno-vremensku obradu signala eliminisan uticaj mikrofonskog niza.



Slika 2.19 Rezultat lokalizacije pomoću algoritma DAMAS2

Na osnovu prikazanog jednostavnog eksperimenta zaključuje se da se upotrebom mikrofonskog niza kao alata i CB algoritma za lokalizaciju ne dobija realna prostorna raspodela zvučnog polja. Rezultat lokalizacije zavisi od karakteristika korišćenog mikrofonskog niza ali i strukture samog zvučnog polja. Korišćenjem algoritama CLEAN-SC i DAMAS2 dobijaju se prostorne raspodele zvučne energije koje zavise samo od stvarnih zvučnih izvora. Uticaj mikrofonskog niza iz konačnog rezultata je eliminisan i ovi algoritmi se mogu koristiti za analizu zvučnog polja u raznim praktičnim aplikacijama.

3 Dizajn i hardverska realizacija mikrofonskog niza optimizovanog za monitoring saobraćajne buke

3.1 Uvod

Ekspanzija primene mikrofonskih nizova u analizi različitih akustičkih problema podstakla je istraživanja u oblasti njihovog dizajna. Jedna od tema takvih istraživanja je traganje za optimalnom prostornom konfiguracijom mikrofona koja daje željeni dijagram usmerenosti mikrofonskog niza. Osnovna obeležja dijagrama usmerenosti su širina glavnog loba i relativni nivo bočnih lobova. Širina glavnog loba određuje prostornu rezoluciju koja se može postići, a relativni nivoi bočnih lobova određuju prisutnost lažnih zvučnih izvora u dobijenoj prostornoj raspodeli zvučne energije. Dijagram usmerenosti je frekvencijski zavisn, pa dizajn mikrofonskog niza zavisi od frekvencijskog sadržaja zvuka koje se analizira. Analiza na niskim frekvencijama zahteva međusobno udaljavanje mikrofona u nizu, dok analiza na visokim frekvencijama zahteva relativno gustu mrežu mikrofona sa međusobnim rastojanjima poredivim sa talasnim dužinama najviših frekvencija od interesa. U analizi zvuka u širem frekvencijskom opsegu to vodi ka primeni sistema sa veoma velikim brojem mikrofona, što povećava njegovu cenu i složenost.

Osnovni postupci raspoređivanja mikrofona u prostoru zasnivaju se na korišćenju regularnih nizova koji imaju ravnomerni prostorni raspored mikrofona sa jednakim razmacima između njih. Neke od regularnih geometrija koje su opisane u literaturi su pravougaona, kvadratna, kružna, koncentrično-kružna, itd. [17]. Ovakve geometrije mikrofonskih nizova u domenu prostornih frekvencija imaju za posledicu aliasiranje iznad neke granične frekvencije. To se manifestuje kao pojava izraženih bočnih lobova (engl. *grating lobes*), koji su istog nivoa kao i glavni lob [12]. Problem *grating* lobova rešava se upotrebom neregularnih geometrija nizova. Neregularna geometrija podrazumeva raspored mikrofona u kom postoji minimalno ponavljanje rastojanja između mikrofona. U najboljem slučaju, ne postoje dva para mikrofona sa istim međusobnim rastojanjem. Međutim, ne postoji rešenje u zatvorenoj formi koje bi generisalo takve optimalne pozicije mikrofona. U literaturi je opisan način kojim se neregularna geometrija niza može dobiti upotrebom određenih matematički definisanih

oblika kao što su spirale [35], [36]. Takve pozicije mikrofona dobijaju se relativno jednostavno pomoću nekoliko parametara, ali sa stanovišta praktičnih aplikacija performanse dobijenog mikrofonskog niza mogu biti nezadovoljavajuće. Neregularni mikrofonski nizovi sa slučajnim rasporedom mikrofona potencijalno mogu imati bolje performanse u odnosu na regularne i spiralne nizove. Međutim, veliki broj stepeni slobode u dizajnu mikrofonskog niza otežava pronalaženje pozicija mikrofona u prostoru [12]. Neki algoritmi za dobijanje neregularnih nizova koriste prostorni poremećaj pozicija pojedinih mikrofona u regularnim nizovima i na taj način ostvaruju poboljšane performanse u odnosu na spiralne nizove [37], [38]. Na osnovu željenog *beam patern*-a, moguće je izvršiti nelinearnu optimizaciju pozicija mikrofona u mikrofonskom nizu, sa kriterijumom minimizacije razlika između željenog i dobijenog dijagrama usmerenosti. Jedan od načina za minimizaciju ove razlike je optimizacija zasnovana na genetskim algoritmima [39], [40]. Pošto ove metode za određivanje pozicija često zahtevaju veliko vreme izračunavanja razvijene su određene tehnike da bi se prevazišao taj problem [41]. Druga metoda za određivanje optimalnih pozicija mikrofona u prostoru, pomoću koje se ostvaruje potiskivanje bočnih lobova je metoda konveksne optimizacije [42]. Numeričke metode za globalnu optimizaciju, kao što su *simulated annealing* (SA) u kombinaciji sa intra-blokovskom *Monte Carlo* simulacijom (IBMC) [43] efikasno određuju pozicije mikrofonskog niza na osnov kojih se ostvaruje *beam patern* sa potisnutim bočnim lobovima

U ovom poglavlju prikazan je postupak dizajna planarnog neregularnog mikrofonskog niza korišćenjem optimizacionog iterativnog postupka. Kao kriterijumski parametar za optimizaciju izabran je nivo bočnih lobova u dijagramu usmerenosti i veličina glavnog loba. Cilj takvog dizajna je niz koji će sa unapred ograničenim brojem mikrofona imati potisnute bočne lobove u zadatom frekvencijskom opsegu od interesa. Namena dizajniranog mikrofonskog niza je monitoring saobraćajne buke u urbanim uslovima, pa je frekvencijski opseg od interesa izabran u skladu sa osobinama saobraćajne buke. Sužavanjem frekvencijskog opsega u kom će mikrofonski niz biti korišćen može se postići zadovoljavajući nivo bočnih lobova sa malim brojem mikrofona. Motivacija za ovakav dizajn mikrofonskog niza je činjenica da postojeća komercijalna rešenja dostupna na tržištu rešavaju problem bočnih lobova povećavanjem broja mikrofona, što za posledicu ima veću cenu sistema. Broj mikrofona za dizajnirani mikrofoni je 24, što

je nekoliko puta manji broj u odnosu na postojeća rešenja. Krajni cilj je hardverska realizacija prototipa mikrofonskog niza sa optimizovanim pozicijama mikrofona, dobijenih na osnovu predloženog algoritma.

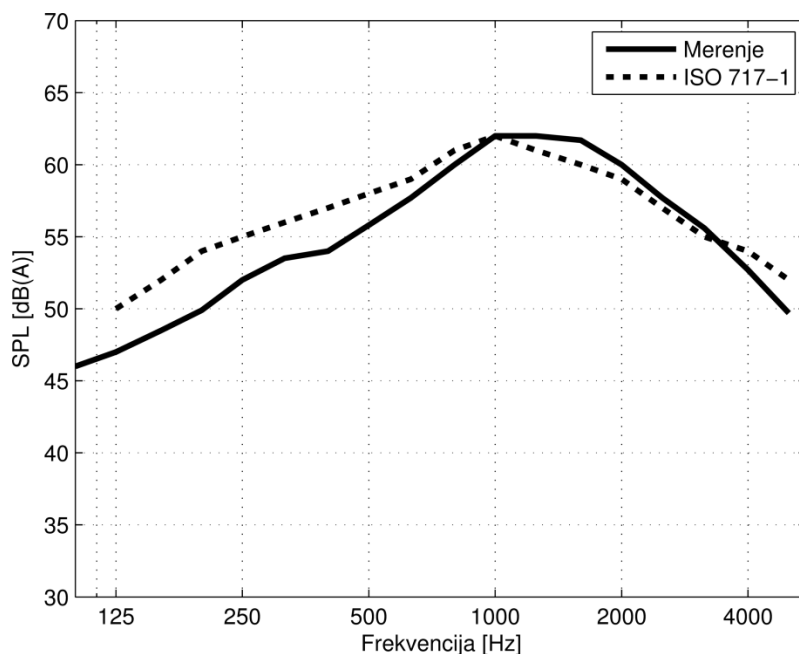
3.2 Karakteristike saobraćajne buke

Dizajnirani mikrofonski niz treba da bude optimizovan za analizu uticaja saobraćajne buke u urbanim uslovima na akustički komfor u zgradama izloženim buci. Izolaciona moć fasadnih pregrada zavisi od incidentnih uglova buke. Merenjem pomoću planarnog mikrofonskog niza, koji se postavlja direktno na fasadu, može se utvrditi ugaona raspodela buke na fasadi. Ova procedura može dovesti do opštih zaključaka o ugaonoj raspodeli incidentne energije, a samim tim i do terenskih vrednosti izolacione moći fasade, u karakterističnim konfiguracijama terena, kao što su kanjon i ne kanjon ulice, raskrsnice, različite širine ulica itd. U urbanim uslovima tipičan je visok nivo buke i ne difuzno zvučno polje. Zbog toga je potrebno da korišćeni mikrofonski niz ima nizak nivo bočnih lobova. Nizak nivo bočnih lobova smanjuje prisustvo lažnih izvora u rezultujućoj slici, dobijenoj pomoću *beamforming* algoritama za obradu signala sa mikrofonskog niza u dalekom zvučnom polju.

Za sam postupak optimizacije potrebno je poznavati osobine saobraćajne buke. Saobraćajnu buku u urbanim sredinama čini veliki broj zvučnih izvora različitog spektralnog sadržaja i nivoa. Standard ISO 717 definiše referentni spektar koji se koristi za opisivanje saobraćajne buke u urbanim sredinama, buke vozova sa malom brzinom i buke aviona na velikom rastojanju [44]. U realnim uslovima moguće su razlike u odnosu na referentni spektar, koje se mogu kvantifikovati merenjima. Na Slici 3.1, pored referentnog spektra, prikazan je i usrednjeni spektar više merenja izvedenim na gradskim ulicama, raskrsnicama sa semaforima i kružnim tokovima [9]. Referentni spektar i spektri dobijeni merenjem ponderisani su A krivom. U literaturi se može pronaći još merenja saobraćajne buke u urbanim uslovima [45], čiji su rezultati slični rezultatima prikazanim u [9].

Pokazano je da spektar saobraćajne buke ima maksimum u oblasti oko 1 kHz i opada ka višim i nižim frekvencijama. Na osnovu oblika spektara zaključuje se da je najveći deo relevantne energije saobraćajne buke koncentrisan u frekvencijskom opsegu od 250 Hz

do 4000 Hz. U aplikaciji za koju se optimizuje mikrofonski niz frekvencijski opseg se može još smanjiti, jer je izolaciona moć fasadnih pregrada na višim frekvencijama relativno velika. Na osnovu toga je procenjeno da je za postupak optimizacije pozicija mikrofona dovoljno uzeti frekvencijski opseg od 250 Hz do 2000 Hz.



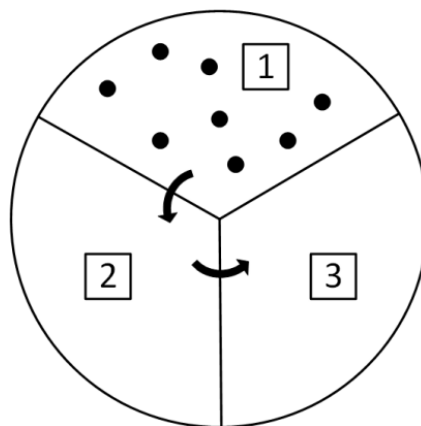
Slika 3.1 Referentni spektar saobraćajne buke [44] i spektar dobijen merenjem [9]

3.3 Algoritam za optimizaciju pozicija mikrofona u mikrofonskom nizu

Bočni lobovi u dijagramu usmerenosti mikrofonskog niza dovode do pojave lažnih zvučnih izvora prilikom lokalizacije izvora u prostoru. Za kvantifikaciju prisutnosti bočnih lobova koristi se parametar MSL (engl. *Maximum Sidelobe Level*), koji predstavlja odnos maksimalnog bočnog loba i glavnog loba mikrofonskog niza [12]. Cilj optimizacionog postupka je smanjivanje nivoa maksimalnog bočnog loba u dijagramu usmerenosti mikrofonskog niza u frekvencijskom opsegu od interesa. Optimizacioni problem može se zapisati na sledeći način:

$$\underset{\{P_r\}}{\text{minimize}} \text{MSL}(f), \text{ za } 250\text{Hz} < f < 2000\text{Hz}, \quad 3.1$$

Usvojeno je da broj mikrofona bude 24 i njihove pozicije je potrebno odrediti u 2D prostoru. Pozicija svakog mikrofona određena je sa dve koordinate, pa je broj nepoznatih parametara koje je potrebno odrediti 48. Veliki broj promenljivih u optimizacionom postupku ima za posledicu kompleksnost numeričkog postupka, a postoji i mogućnost da optimalno rešenje ne bude pronađeno. Zbog toga se u algoritmu optimizuju pozicije ograničenog broja mikrofona, dok se pozicije ostalih mikrofona u nizu dobijaju jednoznačnim matematičkim preslikavanjem koje obezbeđuje neregularnu strukturu. U tom smislu, prostor u kome se raspoređuju mikrofoni ograničen je kružnicom, a mikrofoni su podeljeni u 3 grupe od po 8 mikrofona. Sve grupe imaju istu strukturu i raspoređene su u kružnim isečcima koji odgovaraju uglu od 120° kao na Slici 3.2. Pozicije mikrofona iz grupe 1 dobijaju se optimizacionom procedurom, a pozicije mikrofona grupe 2 i 3 dobijaju se jednoznačno, rotiranjem pozicija mikrofona grupe 1 za 120° , odnosno 240° stepeni, respektivno. Pošto se pozicije mikrofona dobijaju rotacijom jednog sektora apsolutni položaj sektora na krugu neće uticati na nivo bočnih lobova, već samo na njihovu poziciju u odnosu na glavni lob.

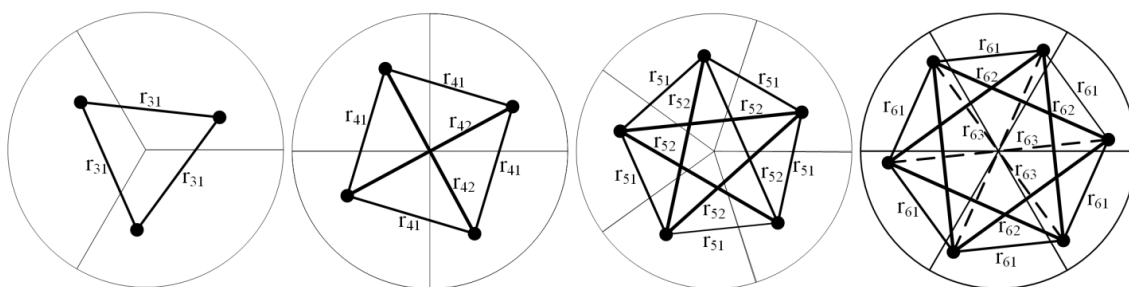


Slika 3.2 Ilustracija principa formiranja pozicija mikrofona

Podelom mikrofona u tri kružna sektora smanjuje se pojava ponovljenih rastojanja između mikrofona, čime je izbegnuta mogućnost pojave jakih bočnih lobova. Na Slici 3.3 prikazane su konfiguracije sa 3, 4, 5 i 6 sektora. Zbog preglednosti prikazani su samo jedan mikrofoni i njegove replike. Ukupan broj mikrofona je 24, pa konfiguracije

sa 3, 4, 5, 6 sektora imaju 8, 6, 5 i 4 mikrofona po sektoru, respektivno. Konfiguracija sa 5 sektora ima ukupno 25 mikrofona, da bi poređenje sa ostalim nizovima bilo validno. Rastojanja između mikrofona na Slici 3.3 označena su sa: r_{31} , r_{41} , r_{42} , r_{51} , r_{52} , r_{53} , itd. Prvi broj u indeksu označava broj sektora u konfiguraciji, a drugi broj označava različite rastojanja koja se pojavljuju u posmatranoj konfiguraciji.

Sa Slike 3.3 se može uočiti da se u konfiguraciji sa 3 sektora rastojanje r_{31} pojavljuje 3 puta (triplet). Kada se u analizu uključi svih 8 mikrofona po sektoru, postojaće 8 različitih rastojanja ponovljenih u tripletima. Povećanjem broja sektora, strukture sa ponovljenim rastojanjima su još složenije, pojavljuju se poligoni sa 4, 5 i 6 distanci za svaki mikrofون unutar sektora. Dodatno, povećavanjem broja sektora u mikrofonskom nizu pojavljuju se ponovljena rastojanja između mikrofona iz različitih sektora, kao što r_{42} , r_{52} , r_{63} , itd, koji ne postoje u konfiguraciji niza sa tri sektora. Analiziranjem međusobnih rastojanja između mikrofona u različitim konfiguracijama uočava se da se u konfiguraciji mikrofonskog niza sa 3 sektora obezbeđuje najveći broj različitih ponovljenih rastojanja. Daljim povećavanjem broja sektora mikrofonski niz konvergira ka koncentrično kružnom mikrofonskom nizu. Takav niz spada u grupu regularnih mikrofonskih nizova, što za posledicu ima pojavu jakih bočnih lobova. Prikazana analiza pokazuje da korišćena konfiguracija sa 3 sektora ima najmanji broj ponovljenih rastojanja između mikrofona.



Slika 3.3 Različite prostorne konfiguracije nizova

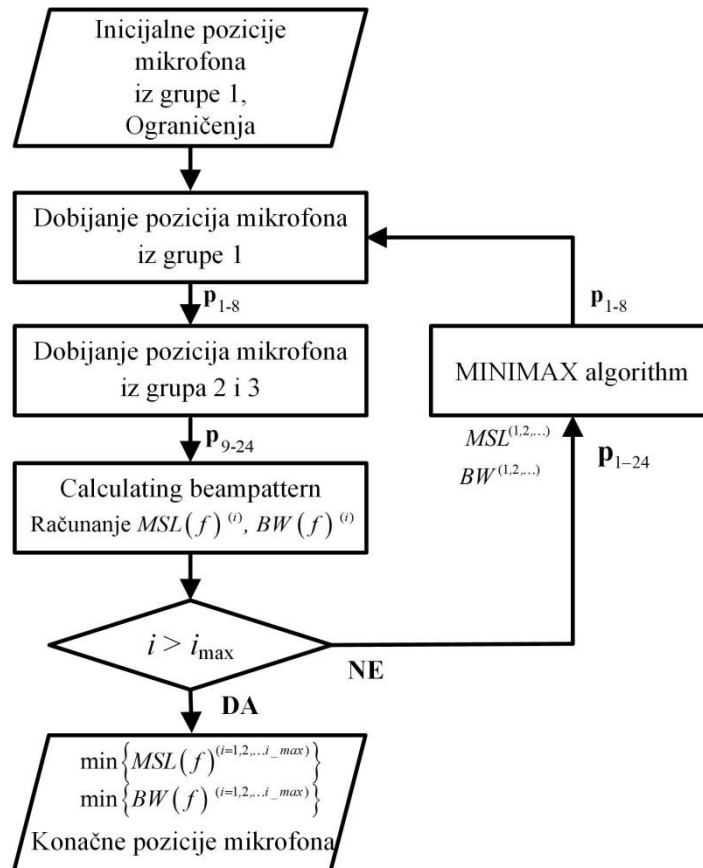
Ukoliko bi se u optimizacionom postupku koristilo svih 24 mikrofona, odnosno jedan sektor, broj ponovljenih rastojanja između mikrofona bi se dodatno smanjio. Međutim,

takva procedura bi imala veliku računarsku kompleksnost, veliko vreme izračunavanja i na kraju težu hardversku realizaciju u odnosu na predloženi dizajn mikrofonskog niza. Hardverska realizacija se pojednostavljuje u smislu da postoje tri identična segmenta koja je potrebno povezati u konačnoj realizaciji. Ovakvim postupkom broj promenljivih u postupku optimizacije smanjen je sa 48 na 16, čime je smanjena kompleksnost algoritma.

U optimizacioni postupak uneta su neka praktična prostorna ograničenja. Prvo ograničenje je prostor u kom se mogu nalaziti mikrofoni. Granice ovog prostora određuju otvor niza i uslovljene su donjom graničnom frekvencijom radnog opsega. Drugo ograničenje je da se mikrofoni ne mogu nalaziti na međusobnom rastojanju koje je manje od prečnika korišćenih mikrofona. Treće ograničenje odnosi se na minimalnu udaljenost mikrofona od centra niza i uvedeno je zbog potrebe da se u centar niza postavi video kamera određenih dimenzija. Na osnovu toga su u postupku optimizacije utvrđena sledeća početna ograničenja:

1. Maksimalno rastojanje mikrofona od centra 1.2 m;
2. Minimalno rastojanje između mikrofona 0.012 m;
3. Mininimalno rastojanje mikrofona od centra 0.15 m.

Optimizacioni postupak prikazan je dijagramom toka na Slici 3.4. Postupak optimizacije je iterativan i iteracije su na slici označene sa i . Početni korak u optimizaciji je zadavanje inicijalnih pozicija mikrofona iz grupe 1. Izbor početnih pozicija ne utiče na konačan rezultat optimizacije, pa su početne pozicije uzete proizvoljno, zadovoljavajući navedena ograničenja. Zatim se rotacijom pozicija mikrofona grupe 1 određuju pozicije mikrofona iz grupe 2 i grupe 3. Na osnovu pozicija 24 mikrofona određuje se dijagram usmerenosti mikrofonskog niza za frekvencije od interesa i računa se parametar MSL za svaku iteraciju.



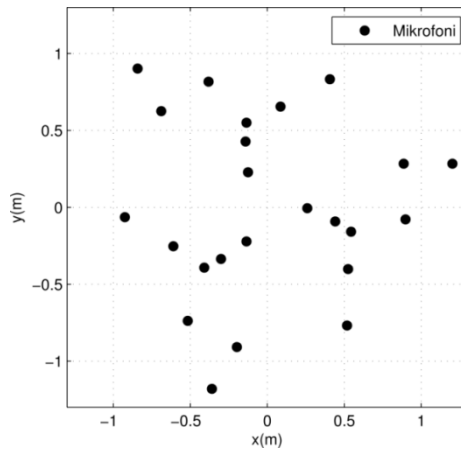
Slika 3.4 Tok dijagram optimizacionog postupka

Beampattern se dobija simulacijom. Simulacioni model za dobijanje pretpostavlja da na mikrofonski niz nailazi ravanski talas i određuje odziv niza, za određene prostorne uglove [46]. Uglovi po azimutu se variraju u opsegu od 0° do 180° , a elevacioni uglovi u opsegu od 90° do -90° . Planarni talas se formira kao superpozicija kompleksnih sinusoida čije frekvencije odgovaraju frekvencijskom opsegu od interesa. U optimizacionom postupku MSL bi trebao da se izračunava za svaku frekvenciju od interesa. Međutim, zbog smanjenja računarske kompleksnosti *beampattern*-a, MSL se računa samo za određene frekvencije. Ove frekvencije predstavljaju centralne frekvencije oktava: 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, i 2 kHz. *Beampattern* ima male varijacije za bliske frekvencije, tako da je uzimanje ovih frekvencija za predstavnike određenih opsega opravdana aproksimacija. U svakoj iteraciji, nakon dobijanja *beampattern*-a, parametar MSL se računa se za ove četiri frekvencije.

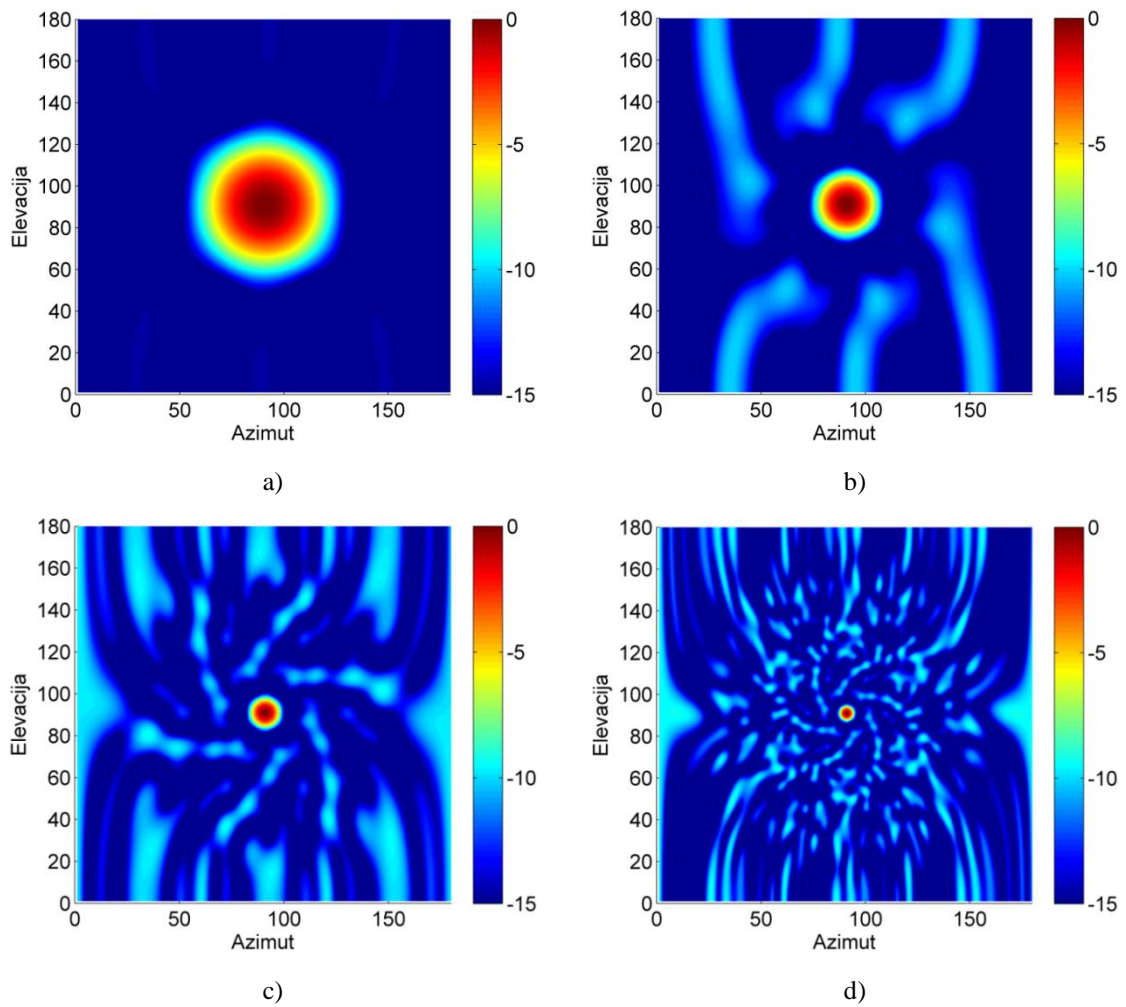
Ukoliko bi se samo parameter MSL koristio kao optimizacioni kriterijum svi mikrofoni bi imali tendenciju da se približe minimalno dozvoljenoj udaljenosti od centra, jer bi to dovelo do niskih nivoa bočnih lobova na visokim frekvencijama, a bočni lobovi na niskim frekvencijama ne bi postojali [46]. Međutim, na niskim frekvencijama, to bi za posledicu imalo veliku širinu glavnog loba, odnosno slabu prostornu rezoluciju mikrofonskog niza. Takav mikrofonski niz, bez obzira na niske bočne lobove na visokim frekvencijama, ne bi bio upotrebljiv za aplikaciju u ovom radu zbog male selektivnosti na niskim frekvencijama. Zbog toga se širina glavnog loba (*beamwidth-BW*) uzima kao dodatni uslov u optimizacionom procesu. BW se takođe računa za četiri pomenute frekvencije. Parametri MSL i BW se izračunavaju u svakoj iteraciji i zajedno sa pozicijama mikrofona predstavljaju ulazne podatke za sledeći korak za MINIMAX algoritam [47]. Ovaj algoritam rešava nelinearne optimizacione probleme i pogodan je za primenu kada je potrebno minimizirati maksimalnu vrednost nekog parametra uz zadata ograničenja. Na osnovu pozicija mikrofona, vrednosti MSL parametra i BW u prethodnim iteracijama računaju se nove pozicije mikrofona iz prve grupe. Minimalan prostorni korak sa kojim se menjaju koordinate mikrofona u algoritmu je 1 mm. Procedura se ponavlja sve dok se ne dostigne maksimalan broj iteracija. U ovom postupku broj iteracija je 100000. Broj iteracija dobijen je empirijski, jer je utvrđeno da se konačno rešenje ne menja dodatnim povećavanjem broja iteracija. Nakon završetka iterativnog postupka pronalazi se iteracija u kojoj je parametar MSL imao minimalnu vrednost za sve frekvencije od interesa. Pozicije iz iteracije u kojoj su dobijene minimalne vrednosti parametra MSL usvajaju se kao konačni rezultat optimizacionog postupka.

3.3.1 Rezultati algoritma

Rezultat optimizacionog postupka su pozicije 24 mikrofona u 2D prostoru. Na Slici 3.5 prikazan je raspored mikrofona koji je dobijen opisanim optimizacionim postupkom. Maksimalno rastojanje između mikrofona, tj. otvor mikrofonskog niza, iznosi oko 2.2 m, a minimalno rastojanje između dva susedna mikrofona je oko 12 cm. Na osnovu dobijenih pozicija mikrofona izračunat je dijagram usmerenosti mikrofonskog niza [46], koji je prikazan na Slici 3.6, za četiri frekvencije.

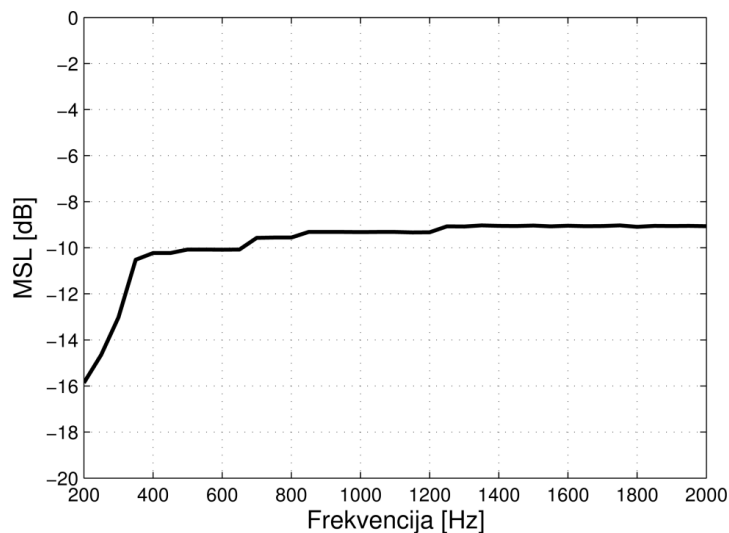


Slika 3.5 Optimizovane pozicije mikrofona dobijene predlozenim algoritmom



Slika 3.6 Dijagram usmerenosti mikrofonskog niza za frekvenciju: a) 250 Hz, b) 500 Hz, c) 1 kHz i d) 2 kHz

Takođe, na osnovu pozicija dobijenih opisanim optimizacionim algoritmom, izračunata je frekventijska zavisnost vrednosti parametra MSL za frekventijski opseg od interesa. Frekventijska zavisnost parametra MSL, izražena u dB, za opseg od 200 Hz do 2000 Hz prikazana je na Slici 3.7. Mikrofonski niz sa optimizovanim pozicijama ima ujednačenu vrednost parametra MSL za gotovo ceo radni opseg, i ona se kreće između -9 dB i -10 dB iznad frekvencije 300 Hz.



Slika 3.7 Frekventijska zavisnost vrednosti parametra MSL

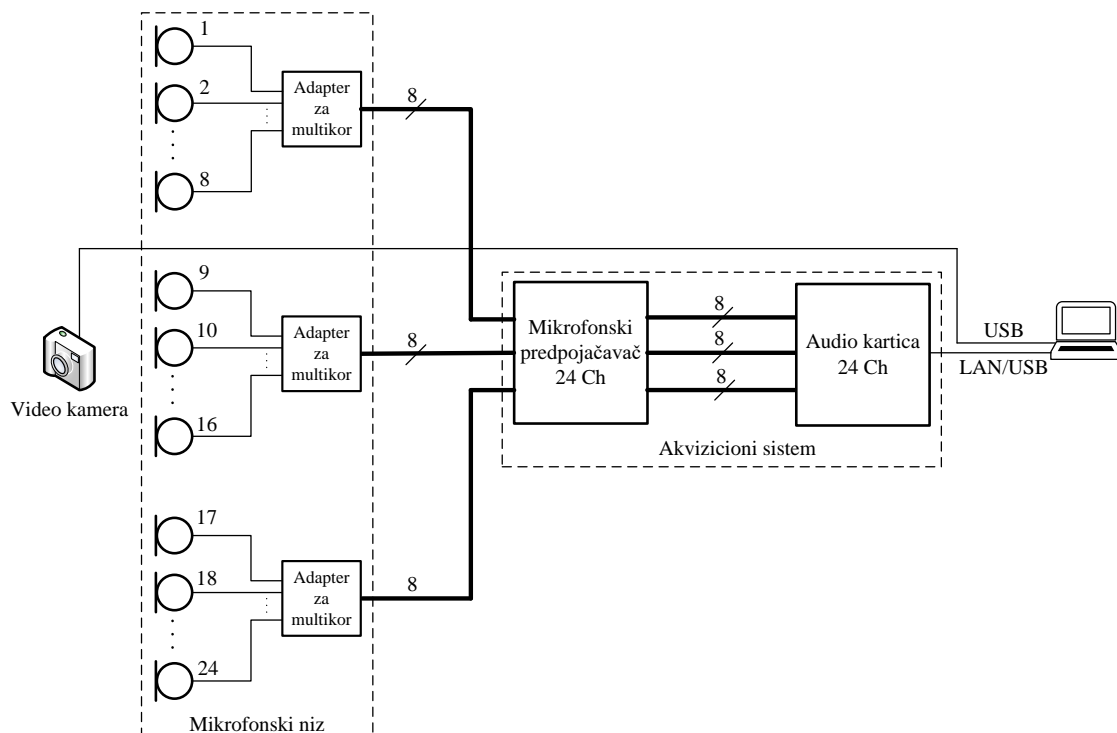
Da bi se kvantifikovao rezultat optimizacionog postupka izvršeno je poređenje dobijenog niza sa nekoliko mikrofonskih nizova neregularnih geometrija iz literature. Za poređenje su korišćena četiri mikrofonska niza: *Dougherty* spirala [35], *Arcondoulis* spirala [36], *Underbrink* spirala [17] i *Multi* spirala [48]. Pozicije mikrofona u ovim mikrofonskim nizovima definisane su spiralama, koje se izračunavaju pomoću nekoliko parametara. Jednačine na osnovu kojih su dobijene pozicije mikrofona, kao i pomenuti parametri preuzeti su iz [48]. Svi nizovi konstruisani su sa 24 mikrofona i otvorom mikrofonskog niza od 2.2 m, kao kod mikrofonskog niza dobijenog opisanim optimizacionim postupkom. Rezultati poređenja sa navedenim geometrijama prikazani su u [49]. Na osnovu dobijenih rezultata poređenja sa ostalim geometrijama mikrofonskog niza zaključeno je da mikrofonski niz sa optimizovanim pozicijama mikrofona ima manje vrednosti parametra MSL u najvećem delu frekventijskog opsega

od interesa, kao i glavni lob iste ili manje širine. Takođe je postignuta ujednačenost vrednosti MSL parametra u celom radnom opsegu.

Rezultat opisanog optimizacionog algoritma je mikrofonski niz sa neregularnim rasporedom mikrofona, koji ima minimizirane bočne lobove u frekvencijskom opsegu bitnom za analizu saobraćajne buke. Broj mikrofona u mikrofonskom nizu smanjen je u odnosu na postojeća rešenja dostupna na tržištu. Smanjenjem broja mikrofona smanjuje se kompleksnost sistema i ostvaruje finansijska ušteda prilikom njegove realizacije. Pokazano je da predloženi optimizacioni postupak daje zadovoljavajuće rezultate sa smanjenim brojem optimizacionih parametara, čime se smanjuje kompleksnost algoritma.

3.4 Hardverska realizacija

Pozicije mikrofona u 2D prostoru određene su na osnovu optimizacionog algoritma, opisanog u prethodnom delu ovog poglavlja. Korišćenje ovako dobijenog rasporeda mikrofona za realna merenja zahteva hardversku realizaciju konstrukcije koja bi omogućila postavljanje mikrofona u prostoru. Pored realizacije konstrukcije potrebno je realizovati sistem za prikupljanje i digitalizaciju signala sa mikrofona. Blok šema električnog dela realizovanog sistema prikazana je na Slici 3.8. Za snimanje signala sa mikrofona potrebno je povezati 24 mikrofona sa akvizicionim sistemom, odnosno ADC (engl. *Analog – Digital Convertor*). Mikrofonski signal je niskog nivoa pa je potrebno pojačati signal na nivo pogodnim za ADC. Pored toga, za rad mikrofona potreban je jednosmerni napon pomoću koga se vrši polarizacija. Zbog navedenih razloga, mikrofoni se povezuju na mikrofonski pretpojačavač, sa čijeg izlaza se signali dalje prosleđuju na ADC. Digitalizovani signali se zatim prenose do računara, gde se vrši njihovo snimanje i dalja obrada. Pored mikrofonskih signala na računar se dovodi i signal sa video kamere koja se nalazi u centru konstrukcije mikrofonskog niza. U ovom potpoglavlju opisana je hardverska realizacija prototipa dizajniranog mikrofonskog niza, sa svim detaljima vezanim za realizaciju pojedinih delova.

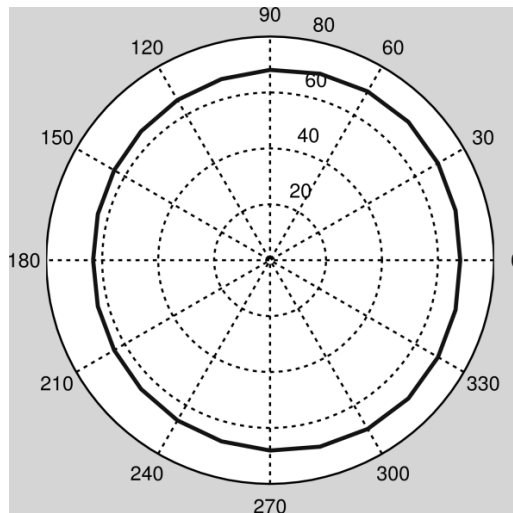


Slika 3.8 Blok šema realizovanog sistema

3.4.1 Mikrofonski niz

U literaturi za obradu signala sa mikrofonskih nizova podrazumeva se da su mikrofoni neusmereni [24], pa je potrebno poznavati koliko korišćeni mikrofoni odstupaju od neusmerenih. Pre same hardverske realizacije prototipa mikrofonskog niza izvršeno je merenje usmerenosti svih mikrofona koji se koriste u sistemu. Na Slici 3.9 prikazana je horizontalna usmerenost jednog mikrofona u oktavi 1000 Hz.

U Prilogu 1, prikazani su rezultati merenja usmerenosti mikrofona u ostalim oktavnim opsezima. Pošto je konstrukcija kućišta mikrofona geometrijski simetrična, merenje je izvršeno samo u horizontalnoj ravni. Na osnovu rezultata merenja zaključeno je da korišćeni mikrofoni imaju karakteristiku usmerenosti koja je vrlo bliska neusmerenom mikrofona na svim frekvencijama od interesa, pa se mogu koristiti za konstrukciju mikrofonskog niza.

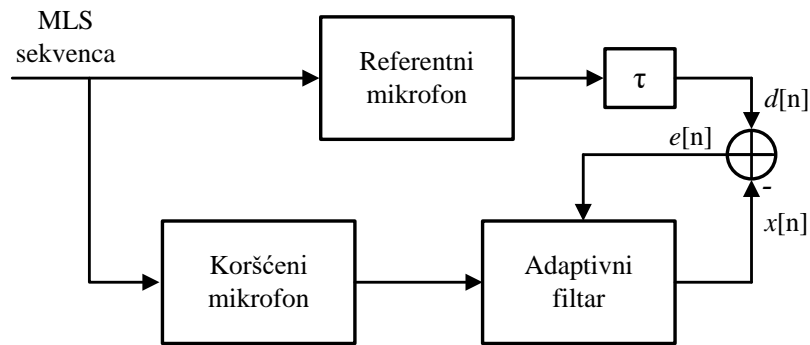


Slika 3.9 Dijagram usmerenosti jednog od korišćenih mikroфона

Korišćeni su elektret mikrofoni sa membranom veličine 0.5 inča. Razlozi za korišćenje elektret mikrofona su nizak napon potreban za polarizaciju i niska cena dostupnih modela na tržištu. Korišćeni mikrofoni ugrađeni su u aluminijumsko kućište, prečnika 12 mm, da bi se povećala njihova robustnost. U Prilogu 2 prikazani su detalji o fizičkim karakteristikama korišćenih mikroфона.

Mikrofoni koji su korišćeni za izradu prototipa mikroфонskog niza ne spadaju u klasu mernih mikroфона, odnosno njihova amplitudska karakteristika nije ravna, a fazna karakteristika nije linearna u celom frekvencijskom opsegu. Da bi se eliminisao uticaj amplitudske i fazne karakteristike mikroфона na rezultat algoritma za lokalizaciju izvora zvuka potrebno je izvršiti korekciju amplitudske i fazne karakteristike. Korekciju je moguće izvršiti na nekoliko načina. Jedan od načina podrazumeva merenje amplitudske i fazne karakteristike mikroфона, a zatim upotrebu ekvalizera, pomoću koga bi se dobila ravna amplitudska karakteristika, odnosno linearna fazna karakteristika. Ovaj metod ima ograničenje jer je potrebno precizno izmeriti amplitudsku i faznu karakteristiku, a zatim ponavljati merenje nakon svake promene parametra ekvalizera. Takvo podešavanje karakteristike za sve mikrofone zahtevalo bi ekvalizer sa 24 kanala i vremenski dug postupak merenja. Drugi način ekvalizacije podrazumeva korišćenje referentnog (mernog) mikroфона i upotrebu adaptivnih filtara. Ovaj metod korekcije amplitudske karakteristike mikroфона zasniva se na poređenju odziva referentnog i

ispitivanog mikrofona, kada oba mikrofona snimaju isti signal. Na Slici 3.10 prikazana je blok šema ovog mernog postupka, korišćenog za kompenzaciju.



Slika 3.10 Blok šema metoda za korekciju amplitudske i fazne karakteristike mikrofona

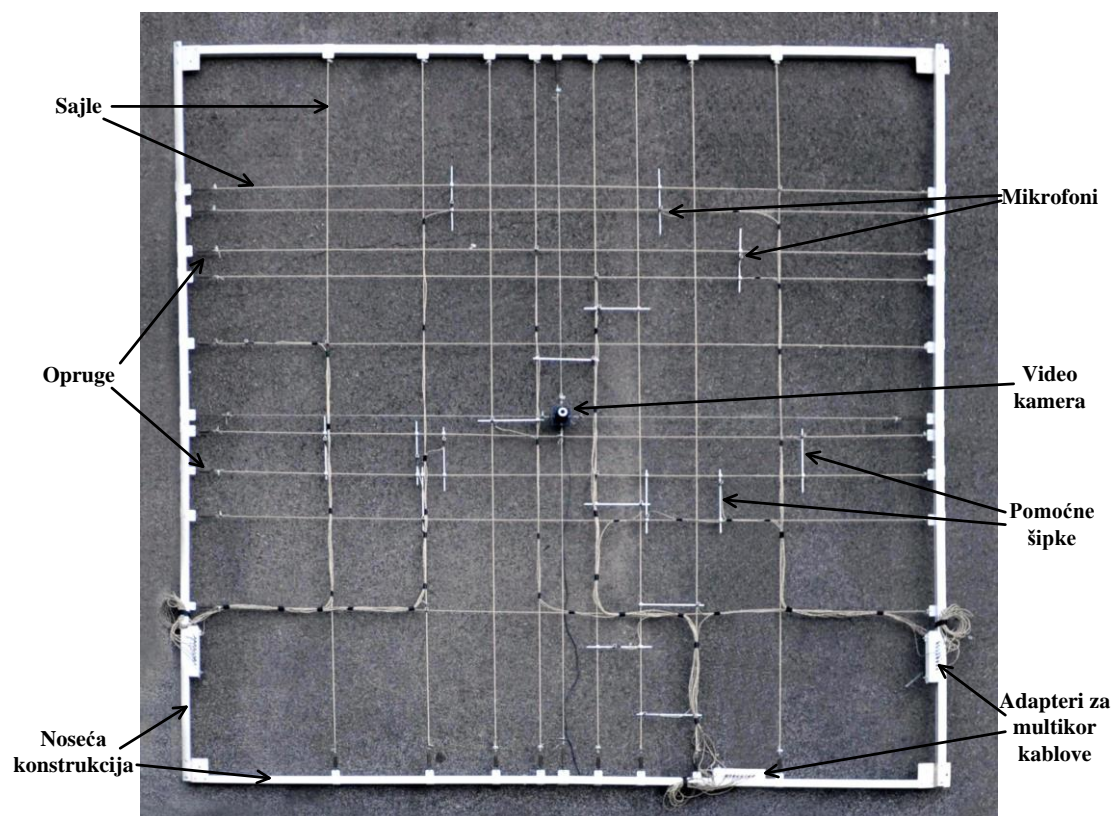
Referentni i ispitivani mikrofoni postavljeni su na blisko rastojanje u anehoičnim uslovima i izloženi su delovanju širokopojanog signala. Na osnovu razlika u snimljenim signalima, vrši se podešavanje adaptivnog filtra, na koji je povezan ispitivani mikrofon. Podešavanje koeficijenata adaptivnog filtra vrši se gradijentnim algoritmom LMS (*Least Mean Square*) [50]. Nakon konvergencije koeficijenata adaptivnog filtra redna veza ispitivanog mikrofona i adaptivnog filtra ima amplitudsku i faznu karakteristiku koje su vrlo bliske karakteristikama referentnog mikrofona. Na ovaj način se postupak merenja značajno ubrzava, jer je samo jednom potrebno snimiti signale sa mikrofona. Pored toga, izbegava se korišćenje precizne merne opreme koja je bila neophodna za prvi način korekcije amplitudske i fazne karakteristike mikrofona. Prvi korak u algoritmu za određivanje pozicije zvučnih izvora u prostoru je filtriranje ulaznih signala sa mikrofona pomoću dobijenog adaptivnog filtra. Prikaz samog adaptivnog algoritma, kao i rezultati korekcije karakteristika mikrofona prikazani su u [51].

U centru mikrofonskog niza predviđeno je postavljanje širokougaone video kamere, pomoću koje dobija se slika prostora u kome se vrši lokalizacija zvučnih izvora. Slika, odnosno video, dobijen sa video kamere može se koristiti za mapiranje zvučne slike na video sliku, ali i za sagledavanje dobijenih rezultata lokalizacije zvučnih izvora na

ulicama. Kamera se postavlja na noseću konstrukciju kao i mikrofoni. Izgled i karakteristike video kamere prikazane su u Prilogu 2.

3.4.2 Mehanička konstrukcija i komponente

Dijametar dizajniranog mikrofonskog niza iznosi 2.2 m, pa je neophodno da konstrukcija na koju se postavljaju mikrofoni ima nešto veći dijametar. Za izradu prototipa izabrana je noseća konstrukcija kvadratnog oblika stranice 2.9 m od aluminijumskih kvadratnih profila. Takvu konstrukciju ne bi bilo moguće jednostavno transportovati do mernih mesta običnim vozilom, pa je konstrukcija sačinjena od više delova koje je moguće sklopiti i transportovati. Konstrukcija se sastoji iz četiri dela, čija dužina nakon rasklapanja iznosi oko 1.5 m. Na konstrukciju su pomoću čeličnih opruga zategnute plastificirane sajle, kružnog poprečnog preseka debljine 3 mm, na koje se postavljaju mikrofoni. Kućište mikrofona omogućava postavljanje mikrofona na ukrštanje dve sajle. Način postavljanja mikrofona na sajle zategnute na noseću konstrukciju prikazan je u Prilogu 2. Da bi se postavilo 24 mikrofona na ovaj način potrebno je podesiti 48 sajli. Postavljanje ovako velikog broja sajli je vremenski zahtevan proces, pa su se za postavljanje mikrofona, pored sajli, koristile aluminijumske šipke kvadratnog poprečnog preseka, iste debljine kao sajle. Ukoliko je između dve blisko postavljene sajle potrebno postaviti mikrofona, aluminijumska šipka se postavlja između sajli i na nju se postavlja mikrofona. Sa ovakvim načinom postavljanja mikrofona, broj sajli smanjen je na 17. Zahtevana tačnost pozicija mikrofona u prostoru je 1 mm, pa je na svim stranicama noseće konstrukcije postavljen lenjir sa milimetarskom podelom. Na Slici 3.11 prikazan je realizovani prototip mikrofonskog niza sa označenim delovima. Označeni delovi konstrukcije detaljno su prikazani u Prilogu 2.



Slika 3.11 Izgled realizovanog prototipa mikrofonskog niza

Povezivanje mikrofona sa akvizicionim delom sistema izvršeno je pomoću višeparičnih kablova (engl. *multicore*) [52] preko kojih se vrši prenos signala i prenos jednosmernog napona za polarizaciju mikrofona. Mikrofone su podeljeni u tri grupe po 8 mikrofona, i svaka od grupa povezana je sa ostatkom sistema pomoću jednog višeparičnog kabla. Da bi se mikrofoni povezali sa višeparičnim kablovima napravljen je poseban adapter na koji su povezani mikrofoni pomoću audio konektora 3.5 mm i multikor kablovi preko konektora DIN 41622 [53]. Prikaz adaptera sa konektorima dat je u Prilogu 2.

3.4.3 Akvizicioni sistem

Akvizicioni deo realizovanog sistema za monitoring saobraćajne buke sastoji se od mikrofonskog pretpojačavača i audio kartice sa 24 nezavisna ADC [54]. Mikrofonski pretpojačavač, pored pojačavanja signala od 12 dB vrši i polarizaciju mikrofona jednosmernim naponom od 12 V. Pretpojačavač je posebno dizajniran za potrebe ovog sistema i realizovan je u Laboratoriji za Akustiku Elektrotehničkog fakulteta u

Beogradu. Karakteristike mikrofonskog pretpojačavača date su u Prilogu 2. Ulazni stepen audio kartice povezan je na izlazni stepen mikrofonskog pretpojačavača. Digitalizovani signali iz audio kartice se prosleđuju u računar preko USB ili LAN veze. Pošto se merenja sa dizajniranim mikrofonskim nizom vrše u spoljašnjim uslovima akvizicioni uređaji ugrađeni su u kutiju koja obezbeđuje zaštitu uređajima prilikom transporta i samog merenja. Na zadnjoj strani kutije dizajnirana je i ugrađena priključna ploča sa svim ulaznim i izlaznim konektorima, čime je obezbeđeno jednostavno povezivanje akvizicionog dela sa mikrofonskim nizom i računarom. Prikaz akvizicionih delova sistema dat je u Prilogu 2.

4 Analiza zvučnog polja u spoljašnjoj sredini upotrebom mikrofonskog niza

4.1 Uvod

Svetska zdravstvena organizacija (WHO – *World Health Organisation*) prepoznala je problem buke u životnoj sredini kao jedan od nekoliko glavnih faktora koji ugrožavaju zdravlje i dobrobit ljudi. Ukoliko nivo buke premašuje određene vrednosti može se javiti negativan uticaj na zdravlje ljudi. Izvori buke u spoljašnjoj sredini, radnom i boravišnom okruženju mogu biti različiti. U toku poslednjih 20 godina na području Evrope urađeno je više studija sa ciljem da se otkriju glavni izvori buke u spoljašnjoj sredini koji posredno utiču i na buku unutar građevinskih objekata. Na osnovu toga je usvojena evropska direktiva 2002/49/EC [3]. Ona je u Srbiji poslužila kao osnov za donošenje Zakona o zaštiti od buke u životnoj sredini [55]. U njemu se definišu načini vrednovanja stanja buke, obaveze i akcioni planovi koje država i njene lokalne samouprave treba da preduzimaju da bi se vremenom smanjivala buka u spoljašnjoj sredini.

Komunalna ili spoljašnja buka definiše se kao buka koja nastaje iz svih izvora izuzev buke koja postoji u industrijskim pogonima. Glavni izvori buke u spoljašnjoj sredini su drumski, železnički i avionski saobraćaj, građevinski radovi, sistemi za ventilaciju i klimatizaciju i susedi. Tako su u poslednjem izveštaju vezanom za implementaciju evropske direktive prikazani rezultati analize broja ljudi koji su izloženi nivoima višim od 55 dBA danju unutar i van naseljenih mesta [3]. Pokazalo se da je 40% populacije u Evropi izloženo nivou saobraćajne buke višem od 55 dBA danju, a da je 20% populacije izloženo nivoima koji su viši od 65 dBA noću. Smatra se da u Evropi polovina stanovnika živi u zonama u kojima nivoi komunalne buke premašuju dozvoljene vrednosti, odnosno da je narušen njihov akustički komfor. Zbog toga je pitanju buke u spoljašnjoj sredini posvećena velika pažnja na svim nivoima.

Merenje nivoa buke standardnim procedurama podrazumeva primenu neusmerenih mikrofona, a stanje buke se izražava vrednošću ekvivalentnog nivoa buke izračunatog u zadatim vremenskim intervalima. Tako dobijeni podatak o stanju buke predstavlja osnovu za procenu akustičkog komfora u zgradama i potrebne vrednosti zvučne

izolacije fasadnih elemenata kojima se štiti unutrašnjost zgrada. Analiza karakteristika saobraćajne buke koja je urađena na dvadesetak lokacija u Beogradu u okviru 24 sata pokazala je da nivo buke na pojedinim mikro lokacijama zavisi ne samo od lokalnih karakteristika saobraćaja na bliskim saobraćanicama, već i od specifičnosti konfiguracije terena, konfiguracije zgrada, uličnih kanjona, udaljenih saobraćanica i slično [56].

Za razliku od prostorija u kojima se u određenoj meri formira homogeno i difuzno zvučno polje, u spoljašnjoj sredini urbanih zona ne postoji difuzno zvučno polje. Ono se može preciznije opisati kao superpozicija direktnog zvuka neposrednih zvučnih izvora (motornih vozila), zvuka koji se reflektovao u okviru poluzatvorenog prostora ograničenog zgradama, zvuka koji dolazi sa udaljenih lokacija kao zbirno dejstvo značajnijih izvora zvuka poput magistralnih saobraćajnica, kao i zvuka koji kroz kanjon ulice dolazi iz susednih optički nevidljivih saobraćajnica. Na svakoj konkretnoj lokaciji odnos energije ovih pojedinačnih komponenti zvuka varira u zavisnosti od lokalnih karakteristika. Poznavanje prostorne, odnosno ugaone distribucije zvučne energije u spoljašnjoj sredini, njenih spektralnih i energetske karakteristika značajno je iz više razloga. To je značajno u planiranju potrebnih mera za smanjenje buke u okviru akcionih planova, a takođe i za procenu potrebnih izolacionih svojstava fasadnih elemenata radi obezbeđenja akustičkog komfora u boravišnim i radnim prostorima zgrada. Pri tome, izolaciona svojstva fasadnih elemenata direktno zavise od ugaone raspodele incidentne energije koja ih pogađa, što će biti detaljnije objašnjeno u nastavku poglavlja. Poznavanje prostorne strukture zvučnog polja ispred fasada omogućilo bi izračunavanje ove raspodele koja u praksi nije poznata.

Algoritmi za prostorno-vremensku obradu signala sa mikrofonskog niza koji su prikazani u drugom poglavlju omogućavaju mapiranje zvučnog polja u prostoru ispred mikrofonskog niza, a to znači određivanje položaja zvučnih izvora i relativnih odnosa energije koju pojedini izvori emituju. Rezultat takvog mapiranja je osnova za određivanje ugaone raspodele energije spoljašnje buke u ravni mikrofonskog niza. Takva raspodela se koristi kao ulazni podatak za procenu ostvarene, odnosno potrebne izolacione moći fasada.

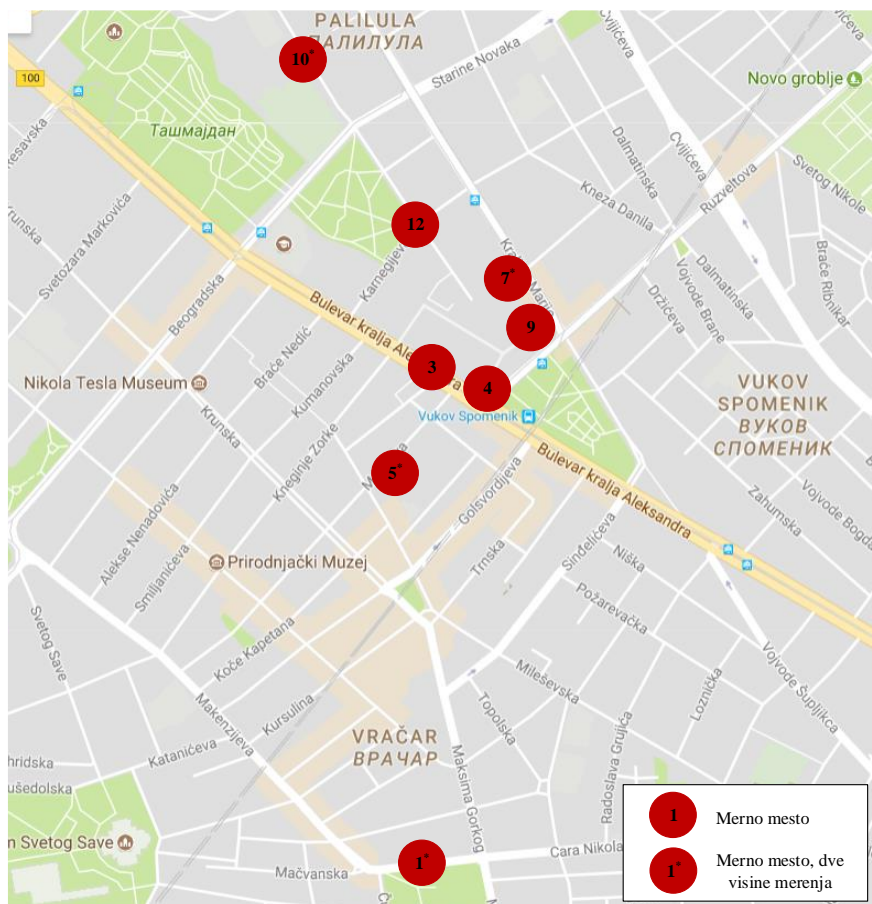
Projektovani mikrofonski niz prikazan u prethodnom poglavlju rada iskorišćen je za eksperimentalnu analizu zvučnog polja na nekoliko izabраниh lokacija u gradu. Lokacije

su odabrane tako da predstavljaju neke karakteristične konfiguracije terena koje se mogu pojaviti u urbanim sredinama. Na njima se očekuju različite strukture zvučnog polja na fasadama zbog različite konfiguracije terena, pozicija lokalnih i udaljenih magistralnih saobraćajnica, različite konfiguracije zgrada i gustine sabračaja u okruženju. U eksperimentima koji su realizovani u okviru ovoga rada mikrofonski niz se nalazio neposredno na fasadnoj pregradi zgrade na lokaciji koja se analizira. Algoritmi za prostorno-vremensku obradu signala primenjeni su na signale dobijene sa mikrofonskog niza i na taj način dobijena je struktura zvučnog polja ispred fasadne pregrade. U ovom poglavlju prikazani su rezultati takve analize. Zbog preglednosti poglavlja i samog rada u ovom poglavlju je prikazan samo deo rezultata, dok se ostatak nalazi u Prilogu 5.

4.2 Merne lokacije

Na Slici 4.1 prikazana je mapa dela Beograda [57], sa označenim mestima na kojima su izvršena merenja mikrofonskim nizom. U Tabeli 4.1 detaljnije su navedene ulice i zgrade na kojima su izvršena merenja. Zvezdica u tabeli predstavlja merno mesto na kom su izvršena dva merenja, za dve različite visine postavljanja mikrofonskog niza u odnosu na podlogu. Više podataka o lokacijama na posmatranim lokacijama prikazano je u Prilogu 4. Izbor lokacija je izvršen tako da se obuhvate sledeće karakteristične situacije:

- a) naspram zgrade na kojoj je postavljen mikrofonski niz nema objekata,
- b) naspram zgrade na kojoj je postavljen mikrofonski niz postoje objekti (takozvane „kanjon ulice“ [58], [59]),
- c) ulice sa velikim brojem saobraćajnih traka, sa ili bez prisustva naspramnih zgrada,
- d) ulice sa širokim trotoarima (površinama između zgrade i kolovoza).



Slika 4.1 Lokacije u Beogradu na kojima su izvršena merenja mikrofonskim nizom [57]

Tabela 4.1 Zbirni pregled ulica u kojima su izvršena merenja

Redni broj merenja	Mesto merenja
1*	Zgrada firme Bit projekt (Cara Nikolaja II 21)
3	Zgrada tehničkih fakulteta (Bulevar kralja Aleksandra 73)
4	Zgrada tehničkih fakulteta (Bulevar kralja Aleksandra 73 – bočno)
5*	Stambena zgrada Molerova 70
7*	Zgrada Zavoda za fiziku (Kraljice Marije 16)
9	Zgrada Zavoda za fiziku (Ruzveltova 1a)
10*	Stambena zgrada Ilije Garašanina 19
12	Zgrada Tehnološkog fakulteta (Karnegijeva 4)

Zbog analize rezultata lokalizacije zvučnih izvora u prostoru ispred fasadne pregrade na svakoj lokaciji su utvrđeni značajni parametri koji definišu profil terena. Parametri koji su važni za analizu su: visina na kojoj je postavljen mikrofonski niz, udaljenost zgrade od bliže i dalje ivice kolovoza, prisutnost i širina trotoara, širina saobraćajnih traka, prisutnost objekata na naspramnoj strani ulice, itd.



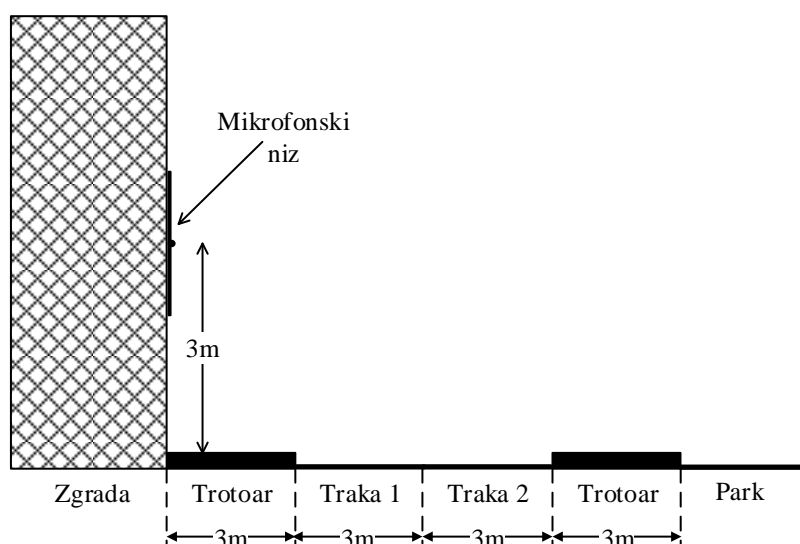
Slika 4.2 Izgled mikrofonskog niza na fasadi zgrade (lokacija 1)

Kao ilustracija, na Slici 4.2 prikazana je jedna od analiziranih situacija gde je mikrofonski niz postavljen na fasadu zgrade (lokacija 1). Centar mikrofonskog niza nalazi se na visini 3 m u odnosu na tlo, što odgovara visini između prizemlja i prvog sprata. Na Slici 4.3 prikazan je profil ulice na ovoj lokaciji. Sa slike se vidi da postoje dve saobraćajne trake kao i trotoari sa parking mestima sa obe strane ulice. Naspram zgrade na koju je postavljen mikrofonski niz nalazi se park, pa ova lokacija spada u kategoriju ulica bez naspramnih objekata u odnosu na mesto merenja.



Slika 4.3 Profil ulice u kojoj se vrši merenje (lokacija 1)

Na Slici 4.4 prikazana je skica preseka ulice na lokaciji 1 sa označenim dimenzijama relevantnih delova ulice. Ova skica je napravljena na osnovu izmerenih dužina elemenata ulice i njena namena je pomoć prilikom analize dobijenih rezultata lokalizacije izvora pomoću mikrofonskog niza i odgovarajućih algoritama za prostorno-vremensku obradu signala. Zbog lakšeg beleženja parametara napravljen je obrazac u koji se unose vrednosti parametara koji su važni za dalju analizu. Izgled obrasca za merenje dat je u Prilogu 3.



Slika 4.4 Profil terena sa bitnim elementima i njihovim dimenzijama (lokacija 1)

Zbog preglednosti teksta u ovom poglavlju nisu prikazani svi rezultati već samo neki u meri koja je potrebna da se izloži ideja i objasne rezultati. Celovit prikaz svih lokacija na kojima su izvršena merenja dat je u Prilogu 4. Prilog sadrži prikaz mernog mesta, profila ulice, prikaz mernog mesta na mapi grada i skicu preseka ulice za svaku od lokacija na kojima je vršeno merenje.

4.3 Izbor parametara za algoritme prostorno-vremenske obrade signala

U proceni prostorne raspodele izvora buke na analiziranim lokacijama korišćena su tri algoritma. To su:

- CB (*Conventional Beamforming*);
- CLEAN-SC;
- DAMAS2 algoritam.

Algoritmi CLEAN-SC i DAMAS2 pripadaju grupi dekonvolucionih algoritama koji polaze od prethodno dobijenih rezultata CB algoritma. Na svakoj mernoj lokaciji snimanje je vršeno u vremenskom intervalu od 30 minuta. Svi pomenuti algoritmi predviđeni su za analizu polja sa stacionarnim izvorima buke. Pošto su u slučaju spoljašnje, dominantno saobraćajne buke izvori pokretni, analiza je vršena na izabranom vremenskom bloku (T). Osim vremenskog bloka značajni ulazni parametar je i izbor vremenskog prozora i broj blokova nad kojima se vrši usrednjavanje (K). Za izračunavanje CSM matrice izabrana je pravougaona prozorska funkcija, pa je konstanta w_s koja se koristi u izrazu 2.8 jednaka 1. Vrednosti parametara T i K izabrane su u skladu sa vrstom zvučnih izvora koji se analiziraju. Pošto se lokalizacija zvučnih izvora vrši u urbanim uslovima, očekuje se da dominantna buka potiče od vozila u saobraćaju. Maksimalno dozvoljena brzina vozila u gradskim uslovima ograničena je na 50 km/h. Parametre T i K potrebno je odabrati tako da za vremenski interval $K*T$ izvor zvuka, u ovom slučaju vozilo, može da se posmatra kao približno stacionaran izvor, odnosno da vrednosti parametara budu što manje. Međutim, za fiksiranu frekvenciju odmeravanja, smanjivanje vremenskog intervala T dovodi do pogoršavanja frekvencijske rezolucije, odnosno povećanja „širine“ frekvencijskog bina. S obzirom da je *steering* vektor frekvencijski zavisna (izraz 2.11), potrebno je da frekvencijski *bin* bude što uži oko nominalne frekvencije za koju se izračunava *steering* vektor, kako bi njegova vrednost

bila validna u celom opsegu. Pošto vrednost parametra T određuje frekvencijsku rezoluciju, ovaj zahtev će biti ispunjen za veće vrednosti parametra T . Dva suprotna zahteva, za malim, odnosno velikim vrednostima parametra T i K nije moguće istovremeno ispuniti, pa je potrebno naći kompromis između ova dva zahteva. Empirijski su izabrane vrednosti $T = 20$ ms i $K = 5$. Za ovako izabrane vrednosti vozilo pri maksimalno dozvoljenoj brzini u gradskim sredinama pređe 1.3 m, što se može smatrati za malo rastojanje imajući u vidu dimenzije ulice i udaljenost mikrofonskog niza od ulice. Na osnovu izraza 2.9, za izabranu vrednost parametra T , frekvencijski opseg u kom se vrši lokalizacija je 48 Hz. Za ovu širinu frekvencijskog opsega može se smatrati da su vrednosti *steering* vektora takve da se tačno može utvrditi lokacija zvučnog izvora u prostoru. Da bi se izračunala fazna kašnjenja signala na mikrofonskom nizu potrebna za izračunavanje *steering* vektora neophodno je poznavati temperaturu ambijenta, jer ona utiče na brzinu prostiranja zvuka. Zbog toga je na svakoj mernoj lokaciji izvršeno merenje temperature pomoću preciznog termometra [60].

Pošto je frekvencijski sadržaj spoljašnje buke različit za različite frekvencijske opsege potrebno je izvršiti lokalizaciju zvučnih izvora u prostoru sa algoritmima za prostorno-vremensku obradu signala u frekvencijskom opsegu od interesa. Na osnovu karakteristika buke koje su prikazane u prethodnom poglavlju frekvencijski opseg u kom se vrši lokalizacija je [250; 2000] Hz. U audiotehnici i akustici uobičajno je da se koriste oktavni ili 1/3 oktavni frekvencijski opsezi za analizu zvučnih pojava [61]. U ovom radu korišćeni su 1/3 oktavni opsezi, kojih u opsegu od 250 Hz do 2000 Hz ima ukupno 10. U algoritmima za prostorno-vremensku obradu signala izabran opseg širine 48 Hz se ne poklapa sa širinom frekvencijskog opsega 1/3 oktave [61]. Zbog toga je nakon lokalizacije za sve frekvencijske opsege širine 48 Hz potrebno izvršiti njihovo odgovarajuće spajanje u 1/3 oktavne opsege.

Prilikom lokalizacije zvučnih izvora potrebno je u samim algoritmima utvrditi prostorne uglove kojima se definiše prostor od interesa. Za definisanje prostora od interesa u ovom radu korišćeni su azimutni ugao φ i elevacioni ugao θ . Na osnovu uvida u konfiguraciju terena u urbanim uslovima izabran je opseg od 80° do 160° za elevacioni ugao, računato u odnosu na ravan fasade. Ovaj opseg uglova je izabran zato što se ne očekuju značajni zvučni izvori koji će se javiti na velikoj, odnosno maloj visini u

odnosu na poziciju na koju se postavlja mikrofonski niz. Vrednosti azimutnih uglova izabrane su iz opsega $[-90^\circ; 90^\circ]$, posmatrano u odnosu na ravan fasade. Ovaj opseg uglova izabran je zato što je fasada zgrade obično paralelno postavljena sa ulicom koja se prostire levo i desno od mesta merenja, pa je potrebno analizirati celu horizontalnu ravan ispred fasade. Da bi se izvršio stvarni uvid u stanje zvučnog polja na mernim lokacijama izvršeno je snimanje u dužem vremenskom intervalu. Trajanje snimanja signala pomoću mikrofonskog niza na svakoj lokaciji iznosilo je pola sata.

Dekonvolucioni algoritmi CLEAN-SC i DAMAS2, korišćeni u ovom radu, baziraju se na iterativnom rešavanju dekonvolucionog problema definisanog izrazom 2.20. Broj iteracija za oba algoritma izabran je empirijski i iznosi 1000 za algoritam DAMAS2 i 15 za CLEAN-SC za svaki vremenski blok koji se analizira.

Tabela 4.2 Izabrane vrednosti parametara u algoritmima za obradu signala

Naziv parametara	Vrednost / Opseg vrednosti	Način dobijanja parametra
Geometrija niza	-	Iz algoritma za optimizaciju pozicija mikrofona
Temperatura ambijenta	-	Merenje na lokaciji
Trajanje snimanja	30 minuta	Empirijski
Frekvencijski opseg	[250 2000] Hz	Radni opseg mikrofonskog niza
Elevacioni ugao θ	[80 160] $^\circ$	Empirijski
Azimutni ugao φ	[-90 90] $^\circ$	Empirijski
Trajanje bloka T	20 ms	Empirijski
Broj blokova za usrednjavanje K	5	Empirijski
Broj iteracija CLEAN-SC	15	Empirijski
Broj iteracija DAMAS2	1000	Empirijski
Rastojanje mikrofonskog niza od ravni skeniranja	Sredina ulice	Empirijski

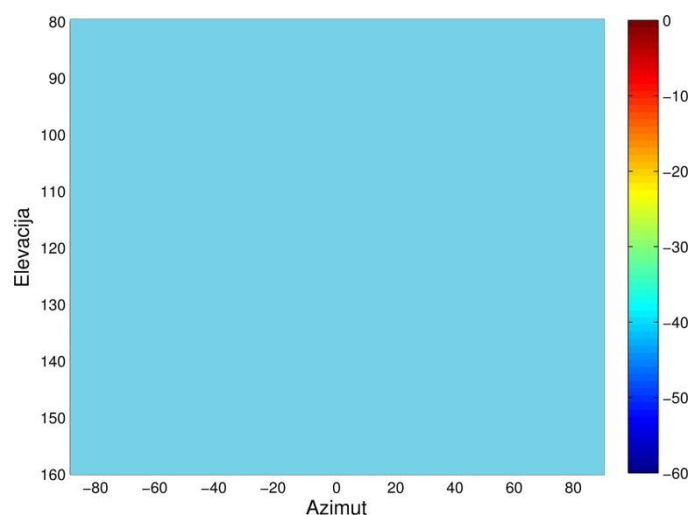
Za određivanje zvučne slike prostora ispred fasade potrebno je, pored svih navedenih parametara, poznavati još i rastojanje ravni mikrofonskog niza od ravni skeniranja. Ovaj parametar se bira proizvoljno i zapravo predstavlja izbor ravni skeniranja u kojoj se želi dobiti raspodela zvučne energije. Zbog toga se nameće pitanje kako izabrati ovo rastojanje tako da rezultat algoritama za obradu signala predstavlja stvarnu raspodelu zvučne energije u prostoru ispred fasade. U ovoj analizi izabrano je da ravan skeniranja bude na sredini ulice na svim analiziranim lokacijama. Takva odluka rezultat je analize koja je prikazana u nastavku ovog poglavlja. U Tabeli 4.2 pregledno su prikazani svi parametri potrebni pri izračunavanju rezultata algoritama za obradu signala sa mikrofonskog niza.

4.4 Način prikazivanja rezultata lokalizacije

Rezultat algoritama za prostorno-vremensku obradu signala sa mikrofonskog niza predstavlja raspodelu zvučne energije u prostoru ispred fasadne pregrade na koju je postavljen mikrofonski niz. Prostor od interesa određen je prostornim uglovima koji su definisani u Tabeli 4.2. Rezultat algoritma treba da bude prikaz sa koga je moguće utvrditi koliko zvučne energije dolazi iz određenog pravca. Pošto je prostor u kom se vrši analiza određen sa dva prostorna ugla, rezultat algoritama mora da bude prikazan na trodimenzionalnom grafiku. Zbog lakše analize rezultati algoritama za prostorno-vremensku obradu signala prikazani su na dvodimenzionalnom grafiku, a vrednosti zvučne energije koja dolazi iz pojedinih pravaca kodovane su bojama. Tople boje na grafiku predstavljaju delove prostora iz kojih dolazi veća energija, dok hladne boje predstavljaju mesta na kojima zvučna energija ima minimalne vrednosti. Na Slici 4.5 dat je prikaz jednog takvog rezultata lokalizacije. Za ovu ilustraciju je zbog jednostavnosti izabrano da raspodela zvučne energije u prostoru bude uniformna (jedna boja u čitavom prostoru).

Na dijagramu su x -osa i y -osa određene azimutnim i elevacionim uglovima, respektivno. Dinamički opseg prikazane zvučne energije je 60 dB za sve grafike u ovoj analizi. Takva vrednost je izabrana zato što se smatra da će u odnosu na izvore sa najvećom snagom svi značajni zvučni izvori biti obuhvaćeni ovom dinamikom. Odgovarajuće vrednosti zvučne energije za određene boje na graficima date su *colorbar*-om, koji je prikazan uz svaki grafik. Na svakom od grafika u ovom poglavlju vrednost zvučne

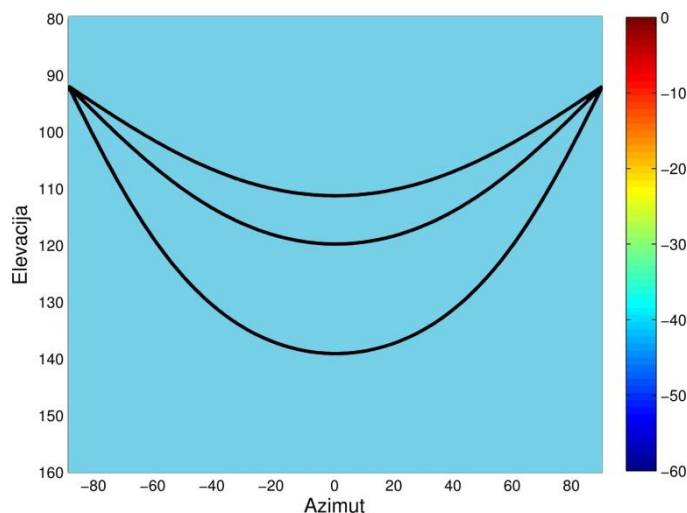
energije skalirana je maksimalnom vrednošću zvučne energije u tom frekvencijskom opsegu, pa je na slikama maksimalna vrednost uvek 0 dB. Skaliranje vrednosti zvučne energije ne utiče na kasnija izračunavanja raspodela uglova incidencije koje ulaze u proračun izolacione moći fasadne pregrade, jer je zadržan relativni odnos energije pojedinačnih izvora.



Slika 4.5 Način prikazivanja rezultata lokalizacije zvučnih izvora korišćen u ovoj analizi

Zbog jednostavnijeg sagledavanja dobijenih rezultata algoritama, kao i zbog njihove dalje analize, na prikaz zvučne mape prostora sa Slike 4.5 ucrtavane su granice ulice koja se analizira. Kao ilustracija, na Slici 4.6 prikazan je rezultat lokalizacije sa Slike 4.5 na kome su crnim linijama ucrtani ivice kolovoza i njegova sredina. Prikaz je napravljen na osnovu lokacije sa slike 4.3, gde je mikrofonski niz bio udaljen 3 m od početka kolovoza koga su činile dve saobraćajne trake širine po 3 m. Dominantna zvučna energija se očekuje sa pozicija koje odgovaraju saobraćajnim trakama, pa je ovim označavanjem moguće olakšano sagledavanje pozicije zvučnih izvora u odnosu na ulicu i odrediti zvučne energije. Pozicija zvučnih izvora određuje se u ravni skeniranja koja je jednako udaljena od mikrofonskog niza za sve vrednosti prostornih uglova. To znači da je ravan skeniranja prostora zakrivljena površina čija je veličina određena maksimalnim vrednostima prostornih uglova. Ukoliko bi se analizirao ceo prostor ispred fasade sa mikrofonskim nizom ta ravan bi bila sferična. Kada se takva ravan

skeniranja prikaže dvodimenzionalno, kao na Slici 4.5, ulica i saobraćajne trake biće krive linije, kao na Slici 4.6.



Slika 4.6 Rezultat lokalizacije zvučnih izvora sa prikazom granica ulice

4.5 Rezultati i diskusija

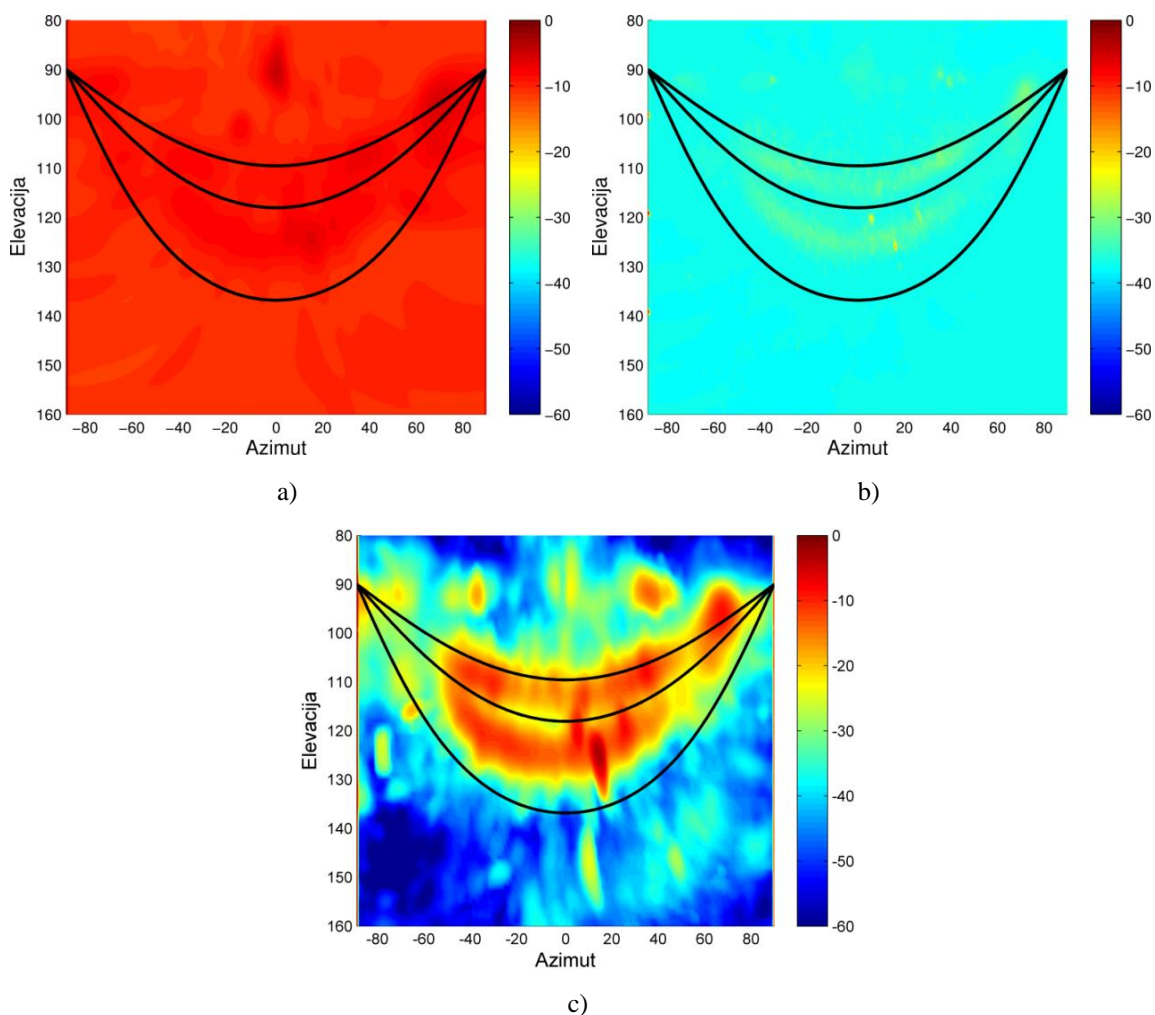
U nastavku su prikazani rezultati prostorno-vremenske obrade signala sa mikrofonskog niza postavljenog na fasadama zgrada na navedenim lokacijama. Analizirane su razlike dobijene pomoću različitih algoritama i na različitim lokacijama, to jest sa različitim konfiguracijama terena. U ovom poglavlju su za predstavljanje rezultata i zaključaka korišćeni rezultati samo sa lokacije 1. U Prilogu 5 nalaze se rezultati lokalizacije zvučnih izvora za sve merne lokacije i sve frekvencijske opsege. Takođe, prikazani su rezultati dobijeni za tri korišćena algoritma u ovoj disertaciji.

4.5.1 Poređenje različitih algoritama za prostorno-vremensku obradu signala

Zvučno polje u urbanim uslovima posledica je više superponiranih izvora zvučne energije. Oni se međusobno razlikuju po energiji, po spektralnom sadržaju, po vrsti talasnog fronta kojim energija dolazi i u pogledu optičke vidljivosti stvarnog izvora zvuka. Zbog činjenice da mikrofonski niz treba da prostorno razdvoji tako različite

izvorce zvuka pokazalo se da algoritmi sa malom dinamikom ne pružaju dovoljno dobru procenu prostorne distribucije izvora.

Na Slici 4.7 prikazan je rezultat dobijen algoritmima CB, CLEAN-SC i DAMAS2 za mernu lokaciju 1 u 1/3 oktavnom opsegu 1250 Hz. Sa slike se uočava da postoje odstupanja u rezultatima za pojedinačne algoritme. Ovaj frekvencijski opseg odabran je proizvoljno kao principijelni prikaz rezultata u ovom poglavlju. Analize rezultata i zaključci izvedeni u ovom poglavlju važe i za druge frekvencijske opsege. U Prilogu 5 mogu se pronaći rezultati i za ostale lokacije.



Slika 4.7 Rezultat lokalizacije izvora na Lokaciji 1 za 1/3 oktavni opseg 1250 Hz dobijen sa: a) CB algoritmom, b) CLEAN-SC algoritmom i c) DAMAS2 algoritmom

Pomoću algoritma CB dobijen je rezultat na osnovu koga bi se moglo zaključiti da je raspodela zvučnog polja na fasadi na kojoj je postavljen mikrofonski niz približno uniformna. Ovakav rezultat sasvim sigurno ne odgovara realnosti jer je izvesno da se ne može javiti ista zvučna energija iz pravca saobraćajnih traka i iz pravca visoko iznad ulice. Najveći deo zvučne energije koja stiže na fasadu očekuje se iz zona u kojima se javlja kontakt pneumatika vozila sa podlogom i neposredno iznad podloge gde se nalaze motori vozila i njihovi izduvni sistemi. Međutim, rezultat dobijen CB algoritmom ne pokazuje takvo stanje. To je posledica male dinamike koja se postiže ovim algoritmom i uticaja karakteristika mikrofonskog niza. Za razliku od toga, na rezultatu dobijenom pomoću CLEAN-SC algoritma uočava se pojava koncentracije zvučne energije na mestima koja odgovaraju saobraćajnim trakama, što je i očekivano. Međutim, u ostalim zonama postoji približno uniformna raspodela energije, odnosno ne pojavljuju se nikakva povećanja energije koja su očekivana, na primer kao reflektovani zvuk od parkiranih automobila ili trotoara. Pošto se princip rada CLEAN-SC algoritma zasniva na koherentnosti koja postoji između sadržaja u glavnom i bočnim lobovima algoritam pored produkata u rezultujućoj mapi koji potiču od bočnih lobova eliminiše i refleksije koje stižu sa malim kašnjenjem u odnosu na direktni zvuk. Brze refleksije predstavljaju koherentne izvore sa izvorom direktnog zvuka, pa ih ovaj algoritam tumači kao sadržaje bočnih lobova, a ne kao stvarne izvore zvuka.

Na Slici 4.7 c) prikazan je rezultat lokalizacije zvučnih izvora na lokaciji 1 pomoću DAMAS2 algoritma. Na slici se uočava da se najveći deo energije javlja na mestima koja odgovaraju saobraćajnim trakama. Takođe, povećana koncentracija zvučne energije pojavljuje se u zonama ispred i iza saobraćajnih traka, odnosno zonama koje odgovaraju trotoaru i parkingu. Ovakav rezultat poklapa se sa očekivanjima gde se mogu javiti potencijalni izvori zvuka na osnovu posmatranja konfiguracije terena i poznavanja pojava pri prostiranju zvuka. Vrednosti energije u zonama koje odgovaraju refleksionim površinama manje su od 10 do 30 dB u odnosu na direktni zvuk, što je u skladu sa očekivanjima.

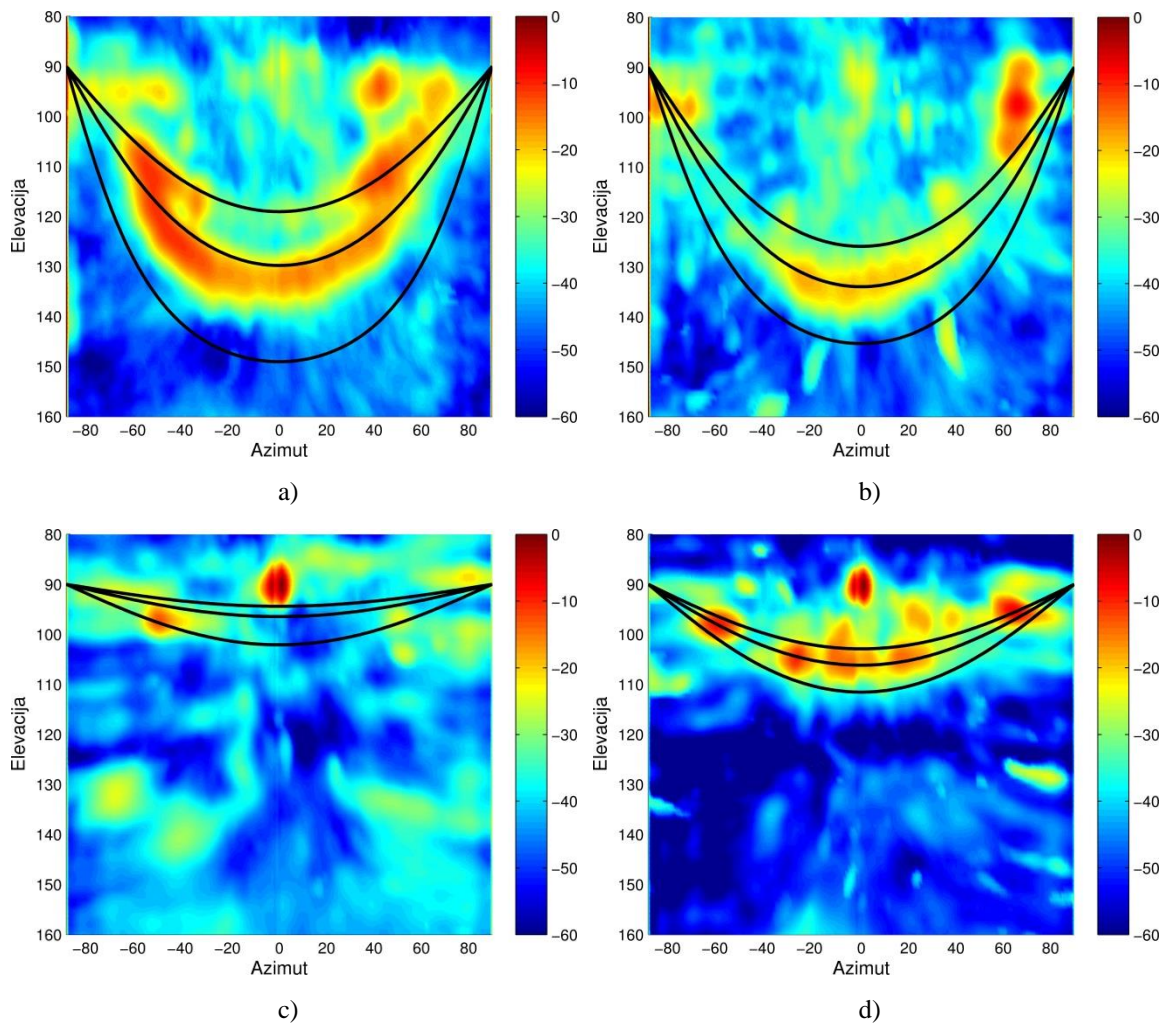
Zvučno polje ispred fasade ima složenu strukturu koja je posledica delovanja više zvučnih izvora različite snage, spektralnog sadržaja i usmerenosti i većeg broja reflektovanih komponenti. Na osnovu prethodne Slike 4.7 zaključuje se da rezultati

procene zvučnog polja u ravni skeniranja dobijeni pomoću CB i CLEAN-SC algoritma ne odražavaju stvarnu sliku zvučnog polja na površini fasade. Rezultat dobijen pomoću CB algoritma pokazuje da je u celom prostoru od interesa vrednost zvučne energije približno ista, dok rezultat dobijen pomoću CLEAN-SC algoritma ne prikazuje pozicije svih zvučnih izvora u prostoru. To znači da se na osnovu ova dva algoritma ne mogu donositi zaključci o položaju zvučnih izvora u prostoru i raspodeli zvučnog polja u ovakvim mernim situacijama. Međutim, rezultat dobijen pomoću CB algoritma je koristan zato što predstavlja prvi korak u DAMAS2 algoritmu, pomoću koga su dobijeni rezultati koji predstavljaju realniju sliku zvučnog polja na fasadi. Polazeći od rezultata CB algoritma, postupkom dekonvolucije algoritam DAMAS2 eliminiše uticaj bočnih lobova mikrofonskog niza i kao rezultat se dobija slika zvučnog polja koja se poklapa sa očekivanom. Zbog toga su iz grupe rezultata dobijenih pomoću korišćenih algoritama rezultati DAMAS2 algoritma odabrani kao referentni za dalju analizu.

4.5.2 Lokalizacije izvora za različite merne lokacije

Pošto je algoritam DAMAS2 odabran kao najbolji za lokalizaciju, sve dalje analize izvršene su nad rezultatima dobijenim takvim postupkom. U daljoj analizi izvršeno je poređenje rezultata lokalizacije za različite merne situacije, to jest lokacije. U Prilogu 4 prikazana je detaljnija konfiguracija terena i pozicija samog mikrofonskog niza. Za ilustraciju rezultata i diskusiju na slici 5.8 prikazane su raspodele zvučnog polja za četiri karakteristične lokacije, a to znači različite mikro urbane konfiguracije. Svi prikazi su za 1/3 oktavni opseg 1250 Hz. Izabrane su lokacije koje su karakteristične svojim različitim profilima terena. Očigledano je da na posmatranim lokacijama postoje značajne razlike u poziciji dominantnih izvora buke.

Na Slici 4.8 a) prikazan je rezultat dobijen za Lokaciju 1, a to je ulica Cara Nikolaja II, gde se centar mikrofonskog niza nalazio na visini 5 m u odnosu na površinu ulice. Pored koncentracije zvučne energije na mestima koja odgovaraju dvema saobraćajnim trakama, sa slike se uočava da postoje i drugi pravci iz kojih se javlja povećana vrednost pristigle zvučne energije. Ovi pravci odgovaraju parkingu na ulici preko puta zgrade na kojoj je postavljen mikrofonski niz i zelenoj površini, odnosno parku koji se nalazi takođe sa druge strane ulice.



Slika 4.8 Rezultat DAMAS2 algoritma za 1/3 oktavni opseg 1250 Hz za: a) Lokaciju 1 (visina 2), b) Lokaciju 5 (visina 1), c) Lokaciju 2, d) Lokaciju 7 (visina 1)

Na Slici 4.8 b) prikazan je rezultat dobijen na osnovu snimka napravljenog u Molerovoj ulici, pri čemu se mikrofonski niz nalazio na visini 5.5 m u odnosu na površinu kolovoza. Za razliku od prethodno prikazane lokacije, na ovoj mernoj lokaciji postoje zgrade naspram fasade na kojoj je postavljen mikrofonski niz. Zbog toga se na rezultatnoj slici, pored energije koja odgovara položaju saobraćajne trake, javlja povećanje energije iz pravaca naspramnih zgrada. Ova lokacija spada u kategoriju „kanjon ulica“ pošto je relativno uska i sa obe njene strane nalaze se zgrade od nekoliko spratova. Na osnovu rezultata lokalizacije pomoću DAMAS2 algoritma uočava se da postoji koncentracija zvučne energije na krajevima ulice. Pošto je „kanjon ulica“ zatvorena sa svih strana osim na njenom ulazu i izlazu, zvučna energija iz šireg

okruženja može ući u nju samo na ta dva mesta. To se uočava i na rezultatu sa Slike 4.8 b). Pošto se Molerova ulica na jednom svom kraju spaja sa Bulevarom kralja Aleksandra, koji je prometna ulica sa velikim brojem traka, velika je vrednost energije koja na tom mestu ulazi u Molerovu ulicu.

Na Slici 4.8 c) prikazan je rezultat lokalizacije zvučnih izvora na Lokaciji 2, odnosno u bulevaru kralja Aleksandra 73 ispred zgrade tehničkih fakulteta. Ispred fasade na kojoj je bio postavljen mikrofonski niz, sa centrom na visini od 3 m u odnosu na trotoar, nalazi se plato popločan tvrdim materijalima, a zatim ulica sa 6 saobraćajnih traka i dve tramvajske trake. Naspram fasade gde je bio postavljen mikrofonski niz nalaze se višespratne zgrade. Reprzentacija ove ulice na grafiku će biti značajno uža što je posledica toga što se mikrofonski niz nalazi na većem rastojanju od ulice. Pored povećanja zvučne energije na mestima koja odgovaraju saobraćajnim trakama pojavljuje se povećanje energije na mestima koja predstavljaju plato ispred zgrade, ali i naspramne zgrade. Koncentracija ispred zgrade i naspramnih zgrada su posledica refleksija zvuka.

Na Slici 4.8 d) prikazana je mapa dobijena pomoću DAMAS2 algoritma za Lokaciju 7. To je zgrada Zavoda za fiziku u Ruzveltovoj ulici, gde se centar mikrofonskog niza nalazio na visini 7.9 m u odnosu na podlogu. Ispred zgrade na kojoj se nalazio mikrofonski niz postoji ravna površina koja je prekrivena travom na koju se nastavlja trotoar, a zatim kolovoz. Ulica ima nekoliko saobraćajnih traka i dve tramvajske trake, a na suprotnoj strani ulice nalaze se prizemni objekti male visine. Na slici se uočava da najveća energija dolazi iz pravaca saobraćajnih traka. Mesto sa povećanom energijom je takođe pozicija raskrsnice Ruzveltove ulice i Ulice kraljice Marije na kojoj postoji zadržavanje vozila zbog semafora. U ovoj situaciji ne ističu se refleksije sa tla neposredno ispred zgrade jer je taj prostor prekriven travom.

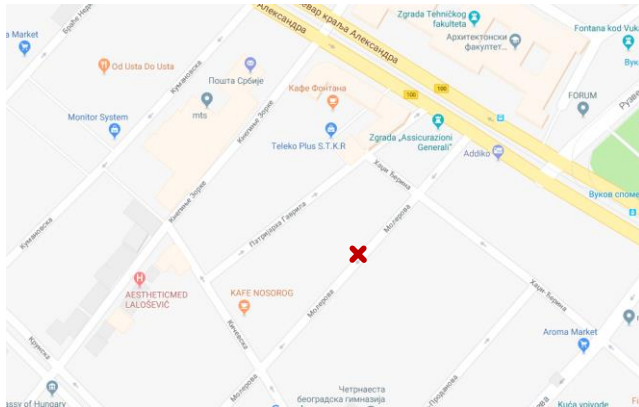
Lokacije koje su odabrane za prikaz rezultata predstavljaju međusobno različite konfiguracije terena. Situacija čiji je rezultat prikazan na Slici 4.8 a) i situacija čiji je rezultat prikazan na Slici 4.8 b) su sličnih dimenzija, i mikrofonski niz se nalazio na približno istoj visini u odnosu na podlogu. Na prvoj lokaciji ne postoje objekti naspram mernog mesta, dok na drugoj lokaciji postoje višespratne zgrade. Ove dve konfiguracije čine dva suprotna slučaja koja se mogu javiti na terenu, a to su „kanjon ulica“ i ulica sa

zelenom površinom na jednoj svojoj strani. Dobijeni rezultati pokazuju da se u slučaju „kanjon ulice“ javljaju refleksije od naspramnih zgrada, ali takođe i koncentracije energije na ulazu i izlazu u taj kanjon. Ovih pojava nema u situaciji gde se naspram mernog mesta nalazi otvorena površina prekrivena zelenilom. Rezultati prikazani na Slikama 4.8 c) i d) takođe predstavljaju dve situacije koje se mogu javiti na terenu, a koje su međusobno suprotne. Dve ulice na ovim lokacijama imaju sličnu konfiguraciju, nekoliko saobraćajnih traka i po dve tramvajske trake. Obe merne lokacije ispred fasade imaju veliku ravnu površinu koja je u jednom slučaju prekrivena tvrdim materijalom, dok je u drugom slučaju prekrivena travom. Razlika između rezultata dobijenih za ove dve situacije javlja se baš na mestima koja odgovaraju ravnim površinama. U jednoj situaciji nema refletovane energije, dok je u drugoj situaciji energija izražena. Situacija u Ulici kraljice Marije dodatno se razlikuje u odnosu na Bulevar kralja Aleksandra po tome što naspram mernog mesta nema višespratnih zgrada, već samo niski prizemni objekti. Zbog toga u situaciji sa Slike 4.8 d) nema reflektovane energije od naspramnih objekata koja postoji u slučaju sa Slike 4.8 c).

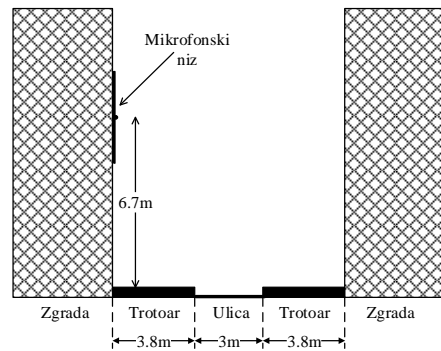
Rezultati dobijeni pomoću mikrofonskog niza na četiri prikazane lokacije sa različitim profilima terena pokazuju da na njima postoje značajne razlike u strukturi zvučnog polja na površini fasada. Te razlike su posledica konfiguracije ulice, odnosno broja saobraćajnih traka, prisutnosti i visine zgrada naspram mesta merenja itd. Zbog razlike u strukturi zvučnog polja u kom se nalazi fasada javiće se i razlika u ugaonim raspodelama spoljašnje buke koja je pogađa. Raspodela ugaone energije može se izračunati na osnovu dobijenih rezultata lokalizacije, što je pokazano i analizirano u nastavku rada. Razlike u ugaonim raspodelama energije spoljašnje buke na fasadi prouzrokuje i razlike u ispoljenoj izolacionoj moći fasadne pregrade.

4.5.3 Spektralne karakteristika različitih izvora buke

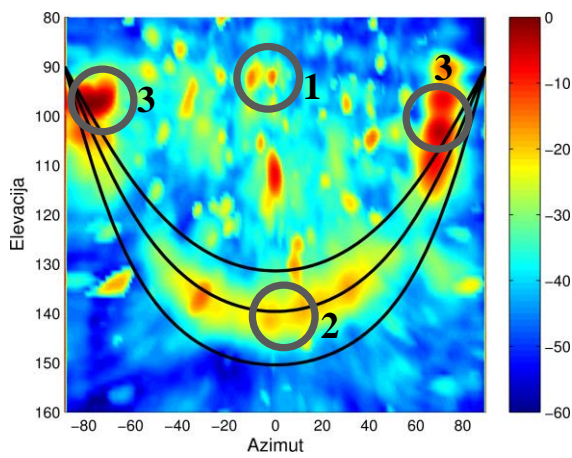
Osim prostorne pozicije dominantnih pravaca stizanja zvučne energije na fasade zgrada značajno je razmotriti i spektralne karakteristike pojedinih izvora koji stvaraju buku u spoljašnjoj sredini. Za takvu analizu iskorišćeni su rezultati dobijeni na Lokaciji 5 u Molerovoj ulici. Na slici 4.9 prikazana je detaljnija struktura mikro lokacije na mapi grada, profil terena, prostorna raspodela polja u opsegu 1/3 oktave na frekvenciji 1600 Hz, kao i spektralne karakteristike zvučne energije pojedinih zona u prostoru.



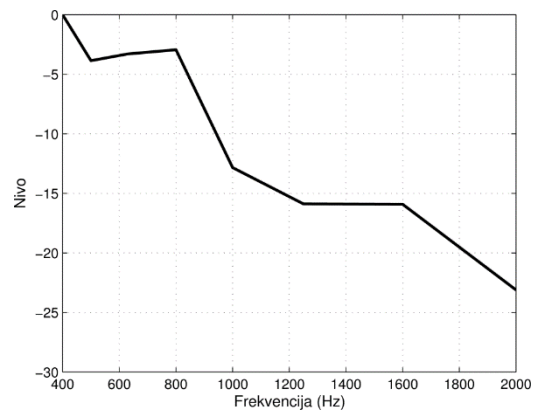
a)



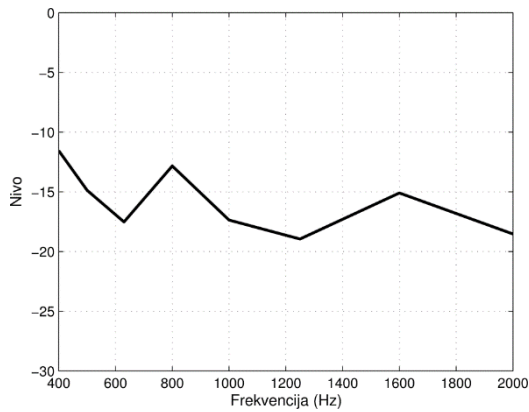
b)



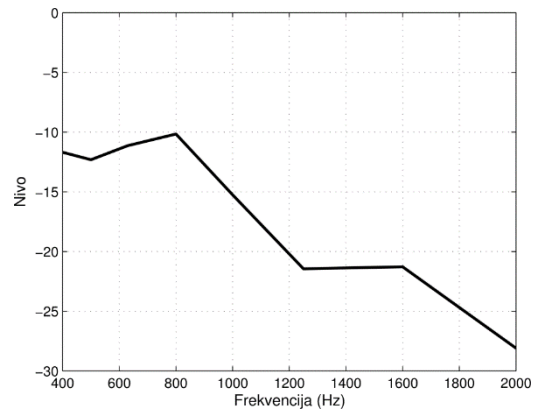
c)



d)



e)



f)

Slika 4.9 a) Lokacija mernog mesta na mapi, b) Profil terena, c) Rezultat lokalizacije za 1/3 oktavni opseg 1600 Hz, d) Ternci spektar za zonu 1, e) Ternci spektar za zonu 2 i f) Ternci spektar za zonu 3

Frekvencijska zavisnost zvučne energije za određene zone dobijena je tako što je izvršeno sumiranje zvučne energije za određene regione, prikazane na Slici 4.9 c), u 1/3

oktavnim opsezima u kojima je vršena lokalizacija zvučnih izvora. Sa Slike 4.9 c) se vidi da postoji različita ugaona raspodela različitih izvora buke koji odgovaraju posmatranoj lokaciji. Analizom položaja mernog mesta, prikazanog na Slici 4.9 a), evidentno je da su dominantni izvori buke saobraćaj u samoj Molerovoj ulici (zona dva na Slici 4.9 c)), Bulevara Kralja Aleksandra (zona 3), buka koja dolazi iz manje prometne i udaljenije Krunske ulice (zona 3) koji i opšti ambijentalni fon buke koja potiče od svih udaljenih izvora u širem okruženju (zona 1). Na Slici 4.9 b) prikazan je profil terena, odnosno Molerove ulice u kojoj se vrši merenje. Zbog relativno male širine ulice i visokih zgrada na obe strane ulice zvučna energija iz bočnih ulica koje nisu vidljive sa pozicije mikrofonskog niza može stići do mesta merenja. Energija ovog tipa pripada zoni 3 sa Slike 4.9 c).

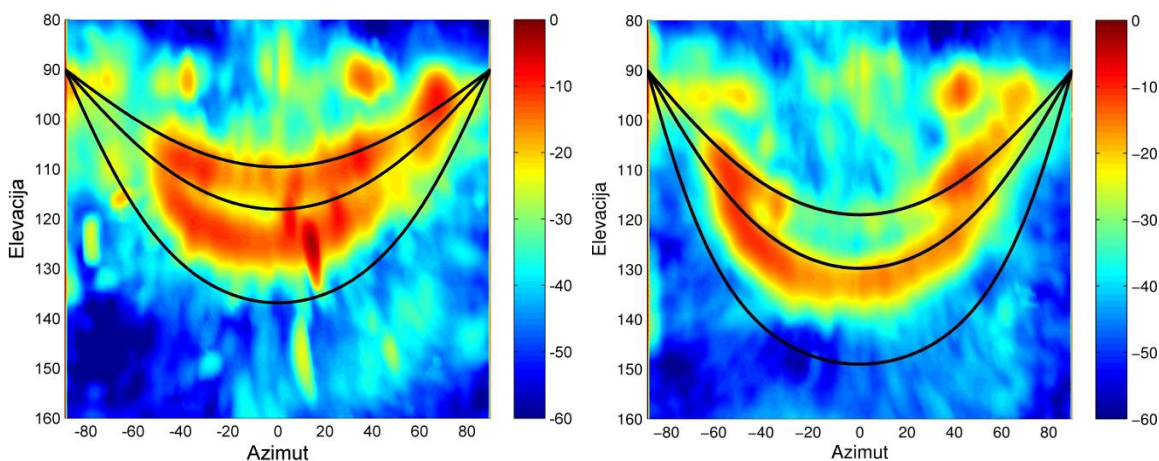
Vrednosti nivoa zvuka prikazani na mapi predstavljaju ekvivalentne nivoe usrednjene u celom posmatranom intervalu od 30 minuta. U zoni 2 vrednosti nivoa su za oko 20 dB niži od vrednosti nivoa koji dolaze iz zone 3. Trenutne vrednosti nivoa buke koju proizvode vozila koja se kreću Molerovom ulicom dostižu veće maksimalne vrednosti, ali je gustina saobraćaja u toj ulici relativno mala, pa su tako ekvivalentne vrednosti nivoa niže od onih koji potiču od udaljenijih saobraćajnica sa mnogo većim i permanetnim saobraćajem. Takođe nivo buke koji je posledica opšteg ambijentalnog fona ima relativno velike ekvivalentne vrednosti zbog uniformnog nivoa u toku posmatranog vremena.

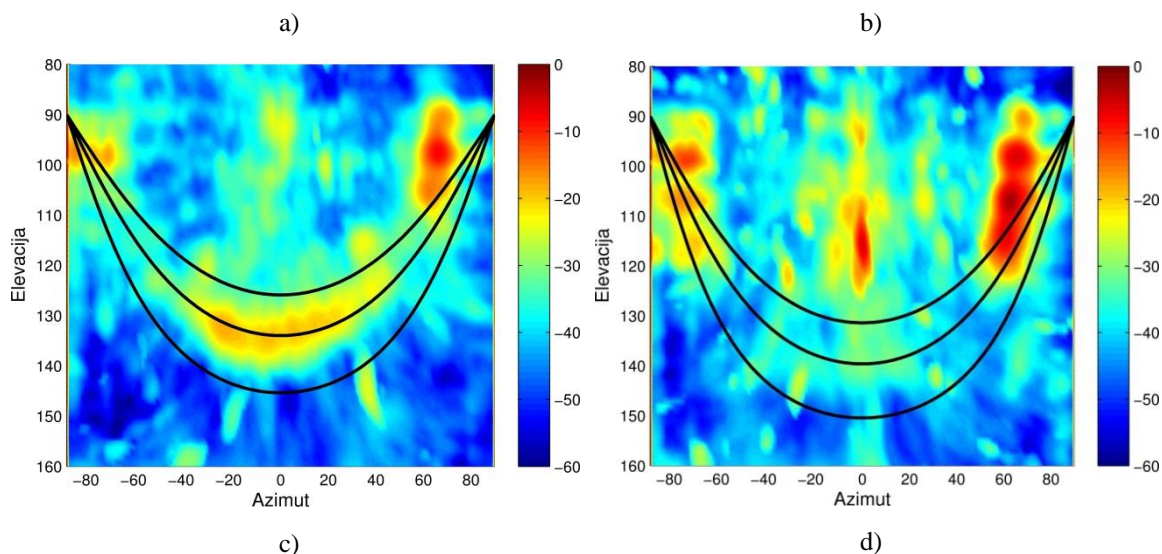
Analizom ukupnog nivoa koji dolazi iz prostornog ugla označenog na slici (zone 1 2 i 3) dobijene su frekvencijske karakteristike saobraćajne buke za ta tri karakteristična izvora. Buka koja dolazi iz zone neposredne saobraćanice (zona 2) ima spektar koji je karakterističan za spektar saobraćajne buke. Buka koja dolazi iz zone 1 predstavlja ambijentalni zvuk koji se odlikuje spektrom sa znatno izraženijim nivoima na niskim frekvencijama. Takva pojava je posledica disipacije u vazduhu na višim frekvencijama usled većih distanci na kojima se nalaze realni izvori. Buka koja dolazi sa bliskih bočnih saobraćajnica takođe ima izraženije nivoe na niskim frekvencijama, ali su razlike spektralnih nivoa na niskim i visokim frekvencijama manje izražene usled manjih distanci, to jest manje izraženog efekta disipacije.

4.5.4 Lokalizacija izvora za različite visine mikrofonskog niza

Rezultati dobijeni pomoću DAMAS2 algoritma iskorišćeni su za analizu razlika na istoj lokaciji, ali za različite visine mikrofonskog niza u odnosu na tlo. Cilj takve analize je utvrđivanje da li se, i u kojoj meri, menja struktura zvučnog polja na fasadi za različite spratne visine. Visine na koje je postavljan mikrofonski niz prilikom snimanja signala bile su određene praktičnim mogućnostima njegovog postavljanja na fasadi. Na nekim lokacijama zbog postojanja klima jedinica, prozora i fasadnog reljefa nije bilo moguće postaviti mikrofonski niz na proizvoljnu visinu. Zbog toga je na svim lokacijama bilo moguće postaviti mikrofonski niz na samo dve visine koje odgovaraju razlici visine jednog sprata.

Na Slici 4.10 a) i b) prikazani su rezultati lokalizacije na Lokaciji 1 za 1/3 oktavni opseg 1250 Hz. Slika 4.10 a) prikazuje rezultat za visinu centra mikrofonskog niza 3 m u odnosu na podlogu, dok Slika 4.10 b) prikazuje rezultat za visinu 5 m. Ove dve visine odgovaraju prizemlju i prvom spratu zgrade na čiju fasadu je postavljen mikrofonski niz. Na obe slike uočava se da najveći deo zvučne energije dolazi iz pravaca koji odgovaraju saobraćajnim trakama. Kada je mikrofonski niz na manjoj visini uočava se koncentracija energije na pozicijama obe saobraćajne trake, dok za položaj niza na većoj visini energija se koncentriše na poziciju između dve saobraćajne trake. Razlika u rezultatima iz ove dve situacije javlja se i u delu koji odgovara trotoaru neposredno ispred fasade. U situaciji prikazanoj na Slici 4.10 b) na pozicijama koje odgovaraju trotoaru ispred zgrade postoji značajno manja koncentracija energije u odnosu na situaciju prikazanu na Slici 4.10 a).





Slika 4.10 Rezultat DAMAS2 algoritma u opsegu 1/3 oktave 1250 Hz za: a) Lokaciju 1 (visina 1), b) Lokaciju 1 (visina 2), c) Lokaciju 5 (visina 1), d) Lokaciju 5 (visina 2)

Na Slici 4.10 c) i d) prikazani su rezultati lokalizacije pomoću DAMAS2 algoritma za Lokaciju 5. Slika 4.10 c) prikazuje je rezultat dobijen kada je centar mikrofonskog niza bio postavljen na visinu 5.5 m u odnosu na tlo, dok Slika 4.10 d) prikazuje rezultat za visinu mikrofonskog niza 6.7 m. Ulica na Lokaciji 5 pripada grupi kanjon ulica. Poredeći rezultate u ove dve merne situacije pojavljuju se veće međusobne razlike, u odnosu na poređenje situacija prikazanih na Slikama 4.10 a) i b). Kada je mikrofonski niz postavljen na manjoj visini najveća energija koncentrisana je na mestima koja odgovaraju ulici i mestima na ulazu i izlazu iz kanjon ulice, kao što je već prikazano u ovom poglavlju. U situaciji kada je mikrofonski niz postavljen na većoj visini najveći deo energije nije koncentrisan na mestima koja odgovaraju ulici, već na mestima koja odgovaraju fasadi bliskih zgrada koje se nalaze prekoputa mikrofonskog niza. Ovakva koncentracija zvučne energije je posledica pojave refleksija od naspramnih zgrada. Zajedničko za ove dve situacije je to što postoji energija na ulazu i izlazu u kanjon ulicu, s tim što je u situaciji sa Slike 4.10 d) zona sa povećanom zvučnom energijom na ulazu u ulicu nešto veća u odnosu na situaciju sa Slike 4.10 c). U obe merne situacije zbog blizine Bulevara kralja Aleksandra na pozicijama koje odgovaraju ulazu u Molerovu ulicu energija je veća u odnosu na pozicije koje odgovaraju suprotnoj strani te ulice.

Na osnovu rezultata prikazanih na Slici 4.10 za dve lokacije i dve visine na kojima je postavljen mikrofonski niz zaključuje se da postoje razlike u strukturi zvučnog polja sa promenom visine mikrofonskog niza od tla. Iako su razlike u visini bile relativno male u odnosu na ukupnu visinu zgrada, pokazano je da izvesne razlike postoje. Prikazani su rezultati za terčni opseg 1250 Hz, ali razlike se javljaju i u ostalim frekvencijskim opsezima, što se može videti u Prilogu 5 na rezultatima za sve merne situacije i sve frekvencijske opsege.

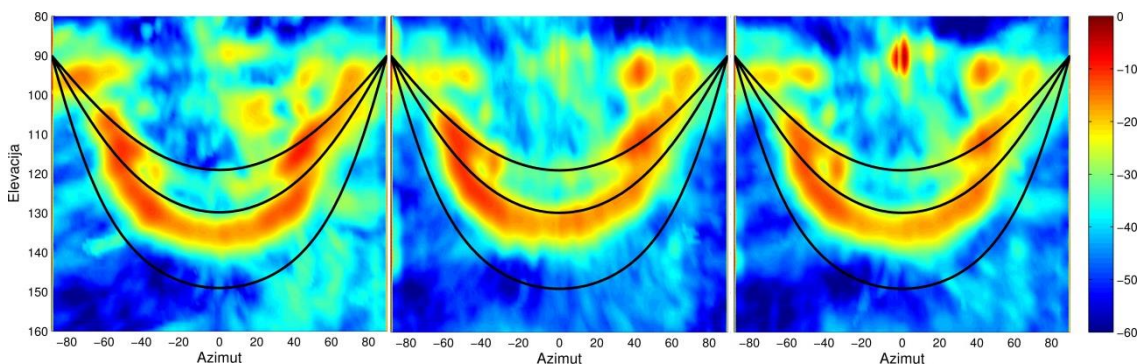
Zbog razlike u strukturi zvučnog polja postoje i razlike u ugaonim raspodelama incidentne energije spoljašnje buke na fasadnoj pregradi. To dalje dovodi do razlika u ispoljenoj izolacionoj moći fasadne pregrade za različite visine u odnosu na podlogu. Na osnovu toga zaključuje se da će vrednost ostvarene zvučne izolacije zavisiti od toga na kom spratu se nalazi analizirana fasadna pregrada.

4.5.5 Uticaj udaljenosti ravni skeniranja na rezultat lokalizacije

Rezultati lokalizacije koji su prikazani u ovom poglavlju dobijeni su za ravan skeniranja postavljenu na sredinu ulice ispred fasadne pregrade. Rastojanje između mikrofonskog niza i ravni skeniranja je ulazni parametar za algoritme koji se koriste u prostorno-vremenskoj obradi signala sa niza. Promena vrednosti ovog rastojanja, to jest promena pozicije ravni u kojoj se vrši skeniranje, može uticati na rezultat lokalizacije izvora u prostoru ispred fasadne pregrade. Zbog toga je cilj analize bilo i ispitivanje da li se rezultat algoritma menja, i u kojoj meri, promenom rastojanja između mikrofona i zamišljene ravni u kojoj se vrši skeniranje. Upoređeni su rezultati algoritama za dve merne lokacije sa tri različita rastojanja od ravni skeniranja.

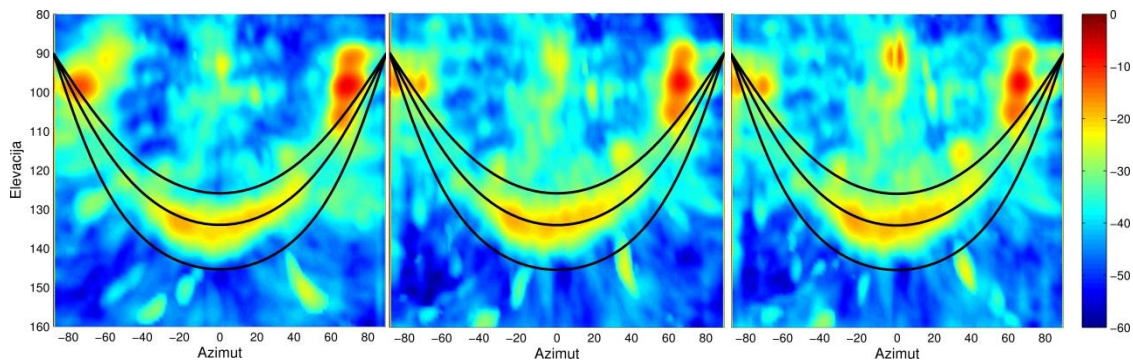
Na Slici 4.11 prikazan je rezultat dobijen algoritmom DAMAS2 za 1/3 oktavni opseg 1250 Hz za Lokaciju 1 za tri različita rastojanja od ravni skeniranja. Na ovoj lokaciji postoji ulica sa dve trake, sa trotoarima, i nema objekata naspram zgrade na koju je postavljen mikrofonski niz. Na levom delu slike prikazan je rezultat kada je ravan skeniranja postavljena na početak kolovoza, na srednjem delu slike prikazan je rezultat kada je ravan skeniranja na sredini kolovoza i na desnom delu slike prikazan je rezultat za situaciju kada je ravan skeniranja postavljena na kraj kolovoza. Za sve pozicije ravni skeniranja sa slike se uočava da se najveći deo zvučne energije nalazi na mestima koja

odgovaraju saobraćajnim trakama. Raspodela energije koja odgovara saobraćajnim trakama je gotovo identična za sva tri slučaja. Izvesne razlike između rezultata, od nekoliko dB, pojavljuju se u zoni trotoara ispred same fasade. Takođe, određene razlike između tri analizirana slučaja postoje u delu koji odgovara položaju parka naspram mesta merenja, ali i ove razlike su male.



Slika 4.11 Rezultat dobijeni algoritmom DAMAS2 za 1/3 oktavni opseg 1250 Hz na Lokaciji 1 za ravan skeniranja postavljenu: na početku kolovoza (levo), na sredini kolovoza (sredina), na kraju kolovoza (desno)

Na Slici 4.12 prikazani su rezultati lokalizacije za 1/3 oktavni opseg 1250 Hz na Lokaciji 5, dobijeni pomoću algoritma DAMAS2. Prikazani su rezultati za tri udaljenosti mikrofonskog niza od ravni skeniranja. Kao i u prethodnom slučaju, ravni skeniranja postavljene su na početak, na sredinu i na kraj kolovoza. Na osnovu prikazanih rezultata uočava se da je struktura zvučnog polja za sva tri slučaja približno ista. Vrednost energije koja odgovara poziciji ulice jednaka je za tri analizirana scenarija. Energija koja dolazi iz pravca Bulevara kralja Aleksandra takođe je ista u svim slučajevima. Određene razlike između rezultata za različite udaljenosti postoje u delu koji odgovara pozicijama naspramnih objekata. Međutim razlike koje se javljaju za ove pozicije nisu veliki i iznose nekoliko decibela. U prostoru neposredno ispred fasadne pregrade nema razlika u strukturi zvučnog polja prikazanog na prethodnoj slici.



Slika 4.12 Rezultat dobijeni algoritmom DAMAS2 za 1/3 oktavni opseg 1250 Hz na Lokaciji 5 za ravan skeniranja postavljenu na: početku kolovoza (levo), sredini kolovoza (sredina), kraju kolovoza (desno).

Dve lokacije koje su prikazane u ovom poglavlju odabrane su zato što je na njima rastojanje mikrofonskog niza od početka ulice (ivice kolovoza) najmanje u odnosu na sve ostale lokacije korišćene u analizi. One kao takve predstavljaju najgori mogući slučaj koji se može javiti. Što je to rastojanje manje, to su razlike tog rastojanja i rastojanja do sredine i suprotne ivice kolovoza procentualno veće. To za posledicu ima da se na tim lokacijama rezultati lokalizacije početka, sredine i kraja kolovoza razlikuju u najvećoj mogućoj meri. Na osnovu rezultata za ove dve lokacije pokazano je da su male razlike u rezultatima lokalizacije za različita rastojanja mikrofonskog niza od ravni skeniranja. Pošto ova dva slučaja predstavljaju situacije u kojima se mogu očekivati maksimalne razlike u rezultatima, zaključeno je da će na ostalim mernim lokacijama te razlike biti još manje. Na osnovu toga izveden je zaključak da izbor pozicije ravni skeniranja neće promeniti rezultat lokalizacije. Pretpostavka da se ravan skeniranja postavi na sredinu ulice ispred fasade koja se analizira na taj način postaje opravdana i za sve rezultate koji su prikazani u ovoj analizi njen položaj je isti.

5 Ugaona raspodela incidentne energije spoljašnje buke na fasadi

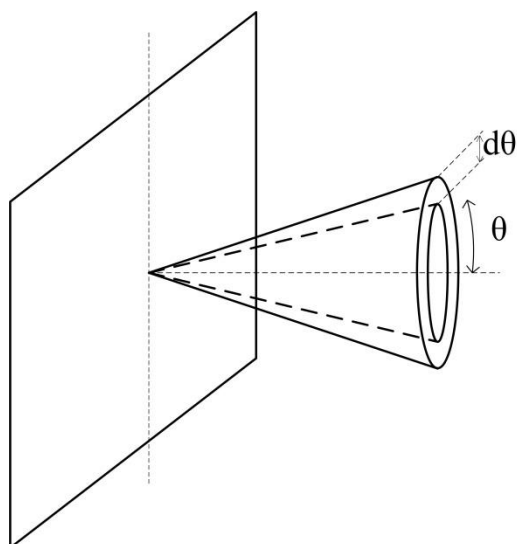
5.1 Uvod

Ugaona raspodela incidentne energije spoljašnje buke na fasadi u opštem slučaju nije poznata. Kao polazna pretpostavka u literaturi se usvaja da ugaona raspoda energije koja pogađa pregradu imao oblik $\sin(2\theta)$. Ova pretpostavka je ispunjena u laboratorijskim uslovima i vrlo malom broju sitacija na terenu. U ovom poglavlju prikazan je način izračunavanja funkcije gustine verovatnoće ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke na fasadi na osnovu rezultata algoritama za prostorno-vremensku obradu signala sa mikrofonskog niza. Funkcija gustine verovatnoće ugaone raspodele incidentne energije je frekvencijski zavisna veličina. Za prikazivanje rezultata u ovom poglavlju izabran je 1/3 oktavni frekvencijski opseg 1250 Hz. Rezultati za ostale frekvencijske opsege, i sve lokacije na kojima su izvršena merenja prikazani su u Prilogu 6 zbog preglednosti. Prikazani su rezultati, odnosno oblici raspodela, dobijeni za različite algoritme za obradu signala sa mikrofonsko niza. Zbog različitih konfiguracija terena u kojima su vršena merenja pretpostavlja se da će oblici raspodela ugaone energije razlikovati u ovim slučajevima. Zbog toga su u ovom poglavlju prikazani rezultati za neke karakteristične merne situacije. Takođe, analizirane su i razlike u oblicima raspodela za istu mernu lokaciju, ali za različite visine postavljanja mikrofonskog niza.

U ovom poglavlju prikazana je metodologija za kategorizaciju mernih mesta na osnovu oblika ugaonih raspodela. Prikazani metod je višedimenzioni jer kao ulazne podatke koristi funkcije gustine verovatnoće ugaone raspodele incidentne energije za deset frekvencijskih opsega i više mernih lokacija. Metod je sproveden nad skupom podataka dobijenim za dvanaest mernih lokacija koje su obrađene u ovoj disertaciji. Broj kategorija (klastera) nije unapred definisan, pa se dodavanjem novih rezultata merenja mogu pojaviti i novi klasteri. Kao rezultat ove metodologije dobija se nekoliko kategorija u kojima se grupišu merne situacije sa sličnim oblicima raspodela. Ovaj rezultat dalje omogućava izračunavanje ostvarenih izolacionih moći za pojedinačne kategorije i utvrđivanje veze između konfiguracije terena i ostvarene izolacione moći.

5.2 Izračunavanje ugaone raspodele incidentne energije

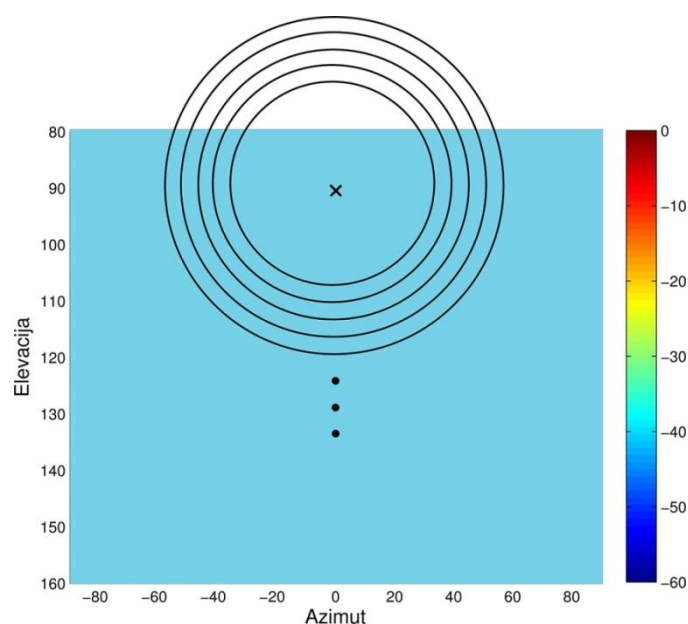
Na Slici 5.1 prikazan je način za određivanje vrednosti ugla incidencije spoljašnje buke. Fasada je uprošćeno prikazana kao ravan, a vrednost ugla se određuje u odnosu na normalu koja je upravna na ravan fasadne pregrade. Incidentni ugao označen je na slici sa θ (ovo nije elevacioni ugao koji nosi istu oznaku). Opseg vrednosti za ugao incidencije je $[0\ 90]$ stepeni, gde 0° odgovara normali na ravan fasade. Vrednosti uglova se razlikuju za pomeraj $d\theta$, koji može biti proizvoljna vrednost. Ista vrednost ugla incidentne spoljašnje buke odgovara prstenu, što se može videti na Slici 5.1. To znači da jednoj vrednosti ugla θ pripadaju svi pravci (parovi azimut - elevacija) koji se nalaze u okviru prstena.



Slika 5.1 Prikaz uglova incidencije na fasadi

Rezultat dobijen pomoću algoritama za lokalizaciju zvučnih izvora predstavlja strukturu zvučne energije u prostoru koji se analizira. Pozicija izvora na rezultatnoj mapi određena je pomoću azimutnog i elevacionog ugla u odnosu na centar mikrofonskog niza. Da bi se na osnovu rezultata dobijenog pomoću algoritma za lokalizaciju dobila ugaona raspodela energije potrebno je izvršiti sumiranje energije koja odgovara vrednosti jednog prstena određenog incidentnim uglom θ i korakom $d\theta$ sa Slike 5.1. Na Slici 5.2 prikazan je izgled prstenova pomoću kojih se vrši sumiranje energije sa rezultatne mape dobijene pomoću algoritama za prostorno-vremensku obradu signala.

Zbog jednostavnosti prikazana rezultatna mapa ima jednaku zvučnu energiju za sve prostorne uglove. Pošto je prostor u kom se određuje raspodela zvučnog polja pomoću algoritama ograničen po azimutnim i elevacionim uglovima kružni prstenovi u kojima se vrši sumiranje neće biti potpuni, već će oblast po kojoj se sumira biti deo kružnog prstena.



Slika 5.2 Računanje raspodele uglova incidencije na osnovu rezultata algoritma za lokalizaciju

Izabrano je da širina prstena bude $d\theta=1^\circ$. Nakon sumiranja po površima koje odgovaraju prstenovima dobija se funkcija gustine ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke. Međutim, pošto su vrednosti zvučne energije na rezultujućoj mapi normalizovane na vrednost maksimalne zvučne energije ukupna suma funkcije gustine raspodele za sve uglove θ nije jednaka 1. Zbog toga se nakon sumiranja vrši normalizacija vrednosti funkcije gustine verovatnoće raspodele sa vrednošću sume funkcije gustine. Na taj način dobija se funkcija gustine verovatnoće čiji je zbir za sve uglove jednak 1. Normalizacija funkcije gustine verovatnoće zadržava relativni odnos zvučnih energija za određene pravce, pa je takav postupak opravdan za dalja izračunavanja u ovoj disertaciji.

5.3 Eksperimentalno određene ugaone raspodele spoljašnje buke na fasadi

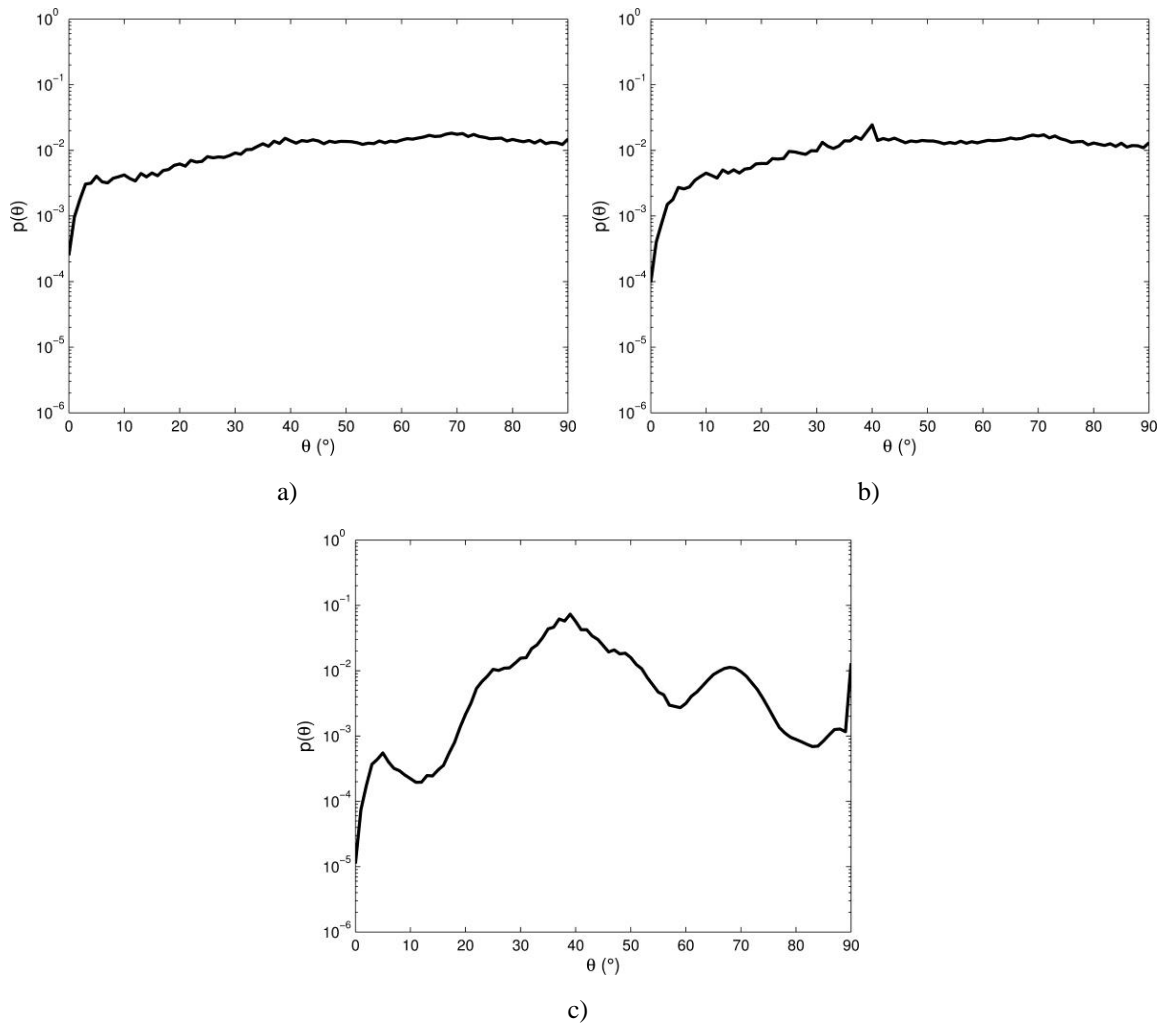
U ovom odeljku prikazane su funkcije gustine verovatnoće incidentne energije spoljašnje buke, izračunate na osnovu rezultata algoritama za prostorno-vremensku obradu signala sa mikrofonskog niza. Analizirane su razlike između oblika raspodela dobijenih na osnovu različitih algoritama za istu mernu situaciju. Takođe, prikazane su funkcije gustine verovatnoće za različite merne situacije i jedan odabrani algoritam za prostorno-vremensku obradu signala. U ovom odeljku analiziran je i uticaj visine na koju se postavlja mikrofonski niz na oblik funkcije gustine verovatnoće incidentne spoljašnje buke na fasadi.

Zbog mogućih velikih razlika u vrednostima funkcije gustine verovatnoće za različite uglove incidencije prikaz funkcija gustine verovatnoće incidentne energije organizovan je tako da je y-osa prikazana u logaritamskoj razmeri. Na taj način moguće je sagledati oblik funkcije gustine verovatnoće za sve vrednosti uglova. Pošto se raspodele dobijaju na osnovu rezultata algoritama za prostorno-vremensku obradu signala za mernu lokaciju postoji raspodela za svaki frekvencijski opseg od interesa. Izabrani su 1/3 oktavni opsezi, kao i kod algoritama za prostorno-vremensku obradu signala. U ovom poglavlju, zbog preglednosti rada, prikazane su raspodele koje odgovaraju 1/3 oktavnom opsegu 1250 Hz, dok su raspodele za ostale frekvencijske opsege i sve merne lokacije obrađene u disertaciji prikazane u Prilogu 6.

5.3.1 Uporedna analiza različitih algoritama za obradu signala

Na Slici 5.3 prikazan je izgled funkcija gustina verovatnoće ugaone raspodele incidentne energije dobijenih za istu mernu lokaciju, ali izračunate pomoću različitih algoritama za prostorno-vremensku obradu signala. Prikazane raspodele odgovaraju rezultatima prikazanim u petom poglavlju. Na Slici 5.3 a) prikazan je rezultat dobijen sumiranjem mape dobijene pomoću CB algoritma, na Slici 5.3 b) prikazan je rezultat dobijen na osnovu CLEAN-SC algoritma, dok je na Slici 5.3 c) prikazan rezultat izračunat na osnovu mape dobijene pomoću DAMAS2 algoritma. Rezultati na Slici 5.3 a) i b) poklapaju se za gotovo sve uglove incidencije. Postoje izvesne razlike između ova dva rezultata u delu prostora koji odgovara saobraćajnim trakama, gde se pomoću algoritma CLEAN-SC dobija povećana energija u odnosu na rezultat dobijen pomoću

CB algoritma. Za vrednosti uglova veće od 20° funkcija gustine verovatnoće uglova incidencije za ova dva slučaja ima približno istu vrednost. To znači da gotovo ista energija pogađa fasadu za uglove incidencije od 20° do 90° . Ovakav rezultat posledica je rezultata algoritama za lokalizaciju, koji su opisani u poglavlju 4 i ne odgovara stvarnoj raspodeli zvučne energije na mernoj lokaciji.



Slika 5.3 Funkcija gustine raspodele uglova incidencije za 1/3 oktavni opseg 1250 Hz dobijena na osnovu rezultata: a) CB algoritma, b) CLEAN-SC algoritma i c) DAMAS2 algoritma

Funkcija gustine verovatnoće ugaone energije spoljašnje buke dobijena pomoću DAMAS2 algoritma pokazuje da postoje velike razlike u vrednostima verovatnoće za određene uglove incidencije. To znači da se iz određenih uglova javlja veća verovatnoća

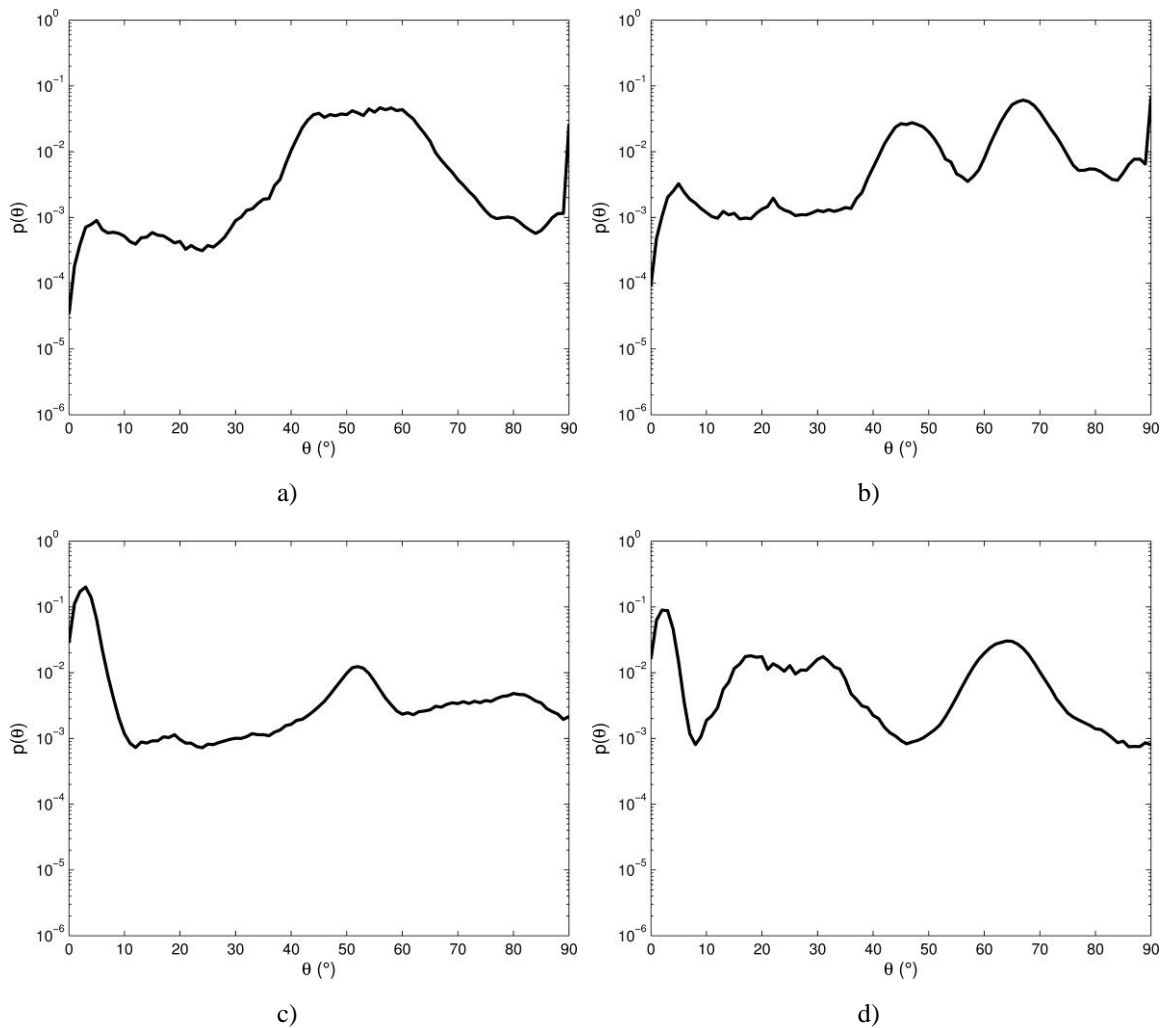
pojave zvučne energije koja pogađa fasadu. Na Slici 5.3 c) se mogu uočiti dva maksimuma, koji odgovaraju uglovima iz kojih dolazi dominantna energija saobraćajnih traka. Takođe, sa slike se uočava da postoji povećana vrednost verovatnoće za uglove bliske 90° , što odgovara slučaju kada incidentna energija “klizi” uz ravan fasade. Sa stanovišta zvučne izolacije povećana verovatnoća za uglove incidencije bliske 90° ima poseban značaj, jer tada se za analiziranu pregradu ostvaruju manje vrednosti izolacione moći.

5.3.2 Ugaone raspodele za različite merne lokacije

Na osnovu rezultata prikazanih u prethodnom odeljku za dalje analize odabrane su raspodele izračunate na osnovu rezultata DAMAS2 algoritma. Na Slici 5.4 prikazane su funkcije gustine verovatnoće ugaone energije spoljašnje buke za četiri različite merne lokacije za $1/3$ oktavni opseg 1250 Hz. Lokacije su izabrane tako da predstavljaju karakteristične profile terena. Cilj ovog odeljka je sagledavanje i kvantifikacija razlika u dobijenim raspodelama između lokacija sa različitim profilima terena. Na Slici 5.4 a) prikazan je rezultat za Ulicu cara Nikolaja II, koja ima dve saobraćajne trake i naspram mesta na kome je postavljen mikrofonski niz nema zgrada. Dobijena funkcija gustine verovatnoće pokazuje da postoje veće vrednosti energije za incidentne uglove u opsegu od 40° do 65° . Ovaj opseg uglova incidencije odgovara pozicijama saobraćajnih traka. Takođe, veće vrednosti verovatnoće incidentne ugaone energije javljaju se i za uglove bliske 90° . Za ostale vrednosti uglova incidencije vrednosti funkcije gustine verovatnoće manje su oko 10 puta u odnosu na zone sa povećanom verovatnoćom. Za male vrednosti uglova vrednosti funkcije gustine verovatnoće značajno opadaju u odnosu na ostale vrednosti uglova. Na osnovu toga može se zaključiti da je analizirana fasadna pregrada izložena zvučnom polju čija raspodela ugaone energije značajno odstupa od uniformne raspodele.

Na Slici 5.4 b) prikazana je funkcija gustine verovatnoće za lokaciju u Molerovoj ulici za $1/3$ oktavni frekventijski opseg 1250 Hz. I ako je ulica jednosmerna i ima samo jednu saobraćajnu traku funkcija gustine verovatnoće ima dva lokalna maksimuma, čije su vrednosti oko 10 puta veće od vrednosti verovatnoće ugaone energije za ostale uglove. Jedan maksimum je posledica koncentracije energije na mestu saobraćajne trake, dok je drugi lokalni maksimum posledica energije koja se javlja na izlazu,

odnosno ulazu u kanjon ulicu. Takođe, velike vrednosti verovatnoće ugaone raspodele javljaju se za vrednosti uglova koje su bliske 90° , a minimalne vrednosti verovatnoće javljaju se za uglove bliske 0° . Poredeći rezultate prikazane na Slici 5.4 a) i b) zaključuje se da postoje sličnosti između oblika raspodela u zonama malih i velikih vrednosti uglova incidencije. Međutim, u ostalim oblastima oblici raspodela se razlikuju u velikoj meri. Najveće razlike javljaju se u oblastima između 40° i 50° . Takođe izvesne razlike postoje u oblasti oko 20° , što je posledica reflektovane energije koja se javlja u Molerovoj ulici.



Slika 5.4 Funkcija gustine raspodele uglova incidencije dobijena pomoću DAMAS2 algoritma za 1/3 oktavni opseg 1250 Hz za: a) Lokaciju 1 (visina 2), b) Lokaciju 5 (visina 1), c) Lokaciju 2, d) Lokaciju 7 (visina 1)

Na Slici 5.4 c) prikazana je funkcija gustine raspodele incidentnih uglova dobijena na osnovu DAMAS2 rezultata za Ulicu bulevar kralja Aleksandra i 1/3 oktavni frekvencijski opseg 1250 Hz. Najveće vrednosti verovatnoće uglova incidencije za ovaj slučaj javljaju se za uglove bliske 10° , što odgovara koncentraciji energije na sredini ulice. Zbog konfiguracije terena, odnosno udaljenosti fasadne pregrade od široke ulice ugao incidencije koji odgovara ulici je mali. Drugi lokalni maksimum u funkciji gustine verovatnoće javlja se oko 50° , što odgovara koncentraciji energije na krajevima ulice. Zbog reflektovane energije od platoa ispred fasade javlja se blago povećanje verovatnoće ugaone raspodele spoljašnje buke u oblasti uglova iznad 60° . Za vrednosti uglova bliske 90° javlja se smanjenje verovatnoće incidentne ugaone energije.

Na Slici 5.4 d) prikazana je funkcija gustine verovatnoće uglova incidencije za merno mesto u Ulici kraljice Marije. Na slici se uočavaju tri lokalna maksimuma. Prvi lokalni maksimum javlja se za vrednosti uglova oko 10° i nastaje kao posledica sumiranja energije koja dolazi od dalekih izvora. Drugi lokalni maksimum zauzima opseg uglova od 15° do 35° i odgovara poziciji sredine ulice. Treći lokalni maksimum odgovara incidentnim uglovima oko 65° , što predstavlja poziciju krajeva ulice i mesta raskrsnice sa Ruzveltovom ulicom, gde postoji povećana koncentracija zvučne energije. Pošto je u ovoj mernoj situaciji doprinos reflektovane energije neposredno ispred fasade zanemarljiv, vrednosti funkcije gustine verovatnoće iznad 75° su male u odnosu na vrednosti koje odgovaraju manjim uglovima incidencije. Minimalna vrednost verovatnoće ugaone energije dobija se za vrednost incidentnog ugla od 90° . Poredeći rezultate prikazane na Slikama 5.4 c) i d) zaključuje se da je oblik funkcija gustina verovatnoće približno isti za oblasti malih uglova incidencije i oblasti velikih uglova incidencije. Za ostale vrednosti uglova incidencije oblici raspodela se značajno razlikuju. Razlike potiču od razlika u doprinosima reflektovane energije ali i od doprinosa zvučne energije koja nastaje na saobraćajnim trakama.

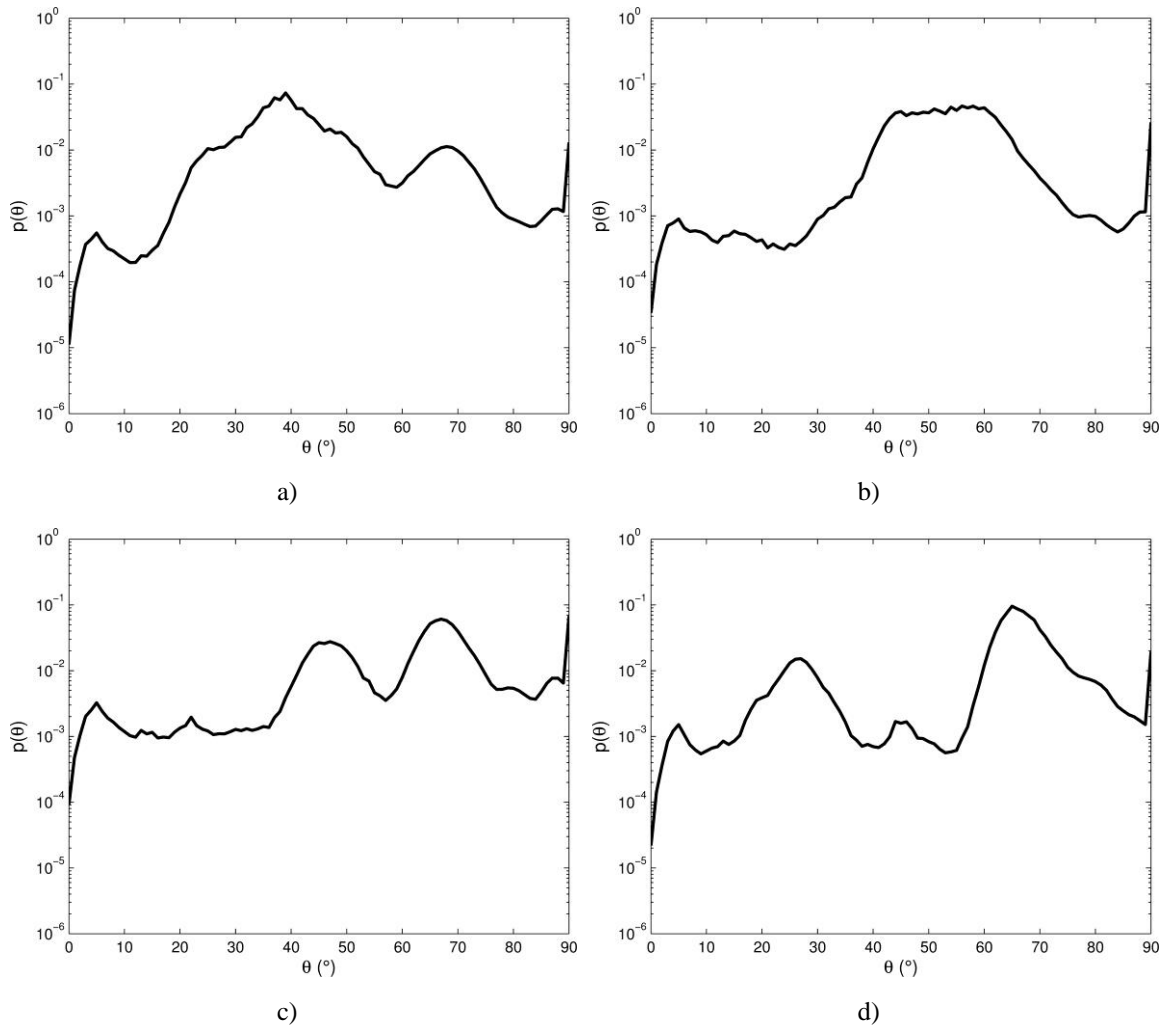
Poredeći oblike raspodela sa Slika 5.4 a) i b) sa raspodelama prikazanim na Slikama 5.4 c) i d) zaključuje se da postoje razlike za sve vrednosti uglova incidencije. Minimumi vrednosti verovatnoće za prve dve slike nastaju za male uglove incidencije, dok se za druge dve situacije na tim uglovima javljaju maksimumi. Zbog bliskog rastojanja ulice od fasade u prve dve merne situacije postoji veća verovatnoća da

spoljašnja buka “klizi” uz fasadu. Zbog velike udaljenosti fasade od ulice i velike širine ulice u druge dve merne situacije javlja se veća verovatnoća nailaska spoljašnje buke na fasadu za male uglove i praktično ne postoji spoljašnja buka koja “klizi” uz fasadu. Navedene razlike ukazuju na to da se na osnovu oblika raspodele može odrediti u koju od grupa spada analizirana ulica. Vrednosti funkcije gustine verovatnoće za uglove između 20° i 70° razlikuju se u velikoj meri za prve dve merne situacije u odnosu na druge dve. Razlike u oblicima raspodela potiču od razlika u konfiguraciji terena u kom se fasada nalazi. Na osnovu toga zaključuje se da će postojati potencijalna razlika u ostvarenoj izolacionoj moći za različite konfiguracije terena u kojima se nalazi fasadna pregrada.

5.3.3 Ugaone raspodele za različite visine mikrofonskog niza

Na Slici 5.5 prikazana su poređenja oblika raspodela za dve karakteristične merne lokacije sa dve merne visine. Prva prikazana merna situacija izvršena je u Ulici cara Nikolaja II, za dve visine na kojima je bio postavljen centar mikrofonskog niza. Na Slici 5.5 a) prikazana je funkcija gustine verovatnoće incidentne ugaone energije dobijene pomoću DAMAS2 algoritma za visinu 3 m, dok je na Slici 5.5 b) prikazan izgled funkcije gustine verovatnoće uglova za visinu merenja 5.5 m. Dve prikazane raspodele imaju isti oblik u opsegu malih i velikih vrednosti uglova, odnosno za uglove bliske 0° i 90° . Ta sličnost je posledica malog rastojanja fasade od ulice, u odnosu na druge merne situacije prikazane u ovoj disertaciji. Minimalne vrednosti verovatnoće ugaone energije za obe merne visine dobijaju se za uglove bliske 0° . Dve raspodele se razlikuju u velikoj meri za sve ostale vrednosti uglova, odnosno za uglove iz opsega od 10° do 80° .

Druga merna situacija je Molerova ulica, koja spada u kategoriju kanjon ulica. Merenja su izvršena kada se centar mikrofonskog niza nalazio na visini 5.5 m i 6.7 m u odnosu na podlogu. Raspodele ugaone energije, odnosno funkcije gustine verovatnoće za ove dve situacije prikazane su na Slici 5.5 c) i d). Kao i u prethodnoj mernoj situaciji postoji dobro poklapanje dve funkcije gustine verovatnoće uglova za vrednosti uglova bliske 0° i 90° . Poklapanje je posledica male vrednosti rastojanja fasade od saobraćajnih traka i vrednosti verovatnoće za te uglove su karakteristika takve konfiguracije terena. Funkcije raspodele za dve visine se razlikuju za sve ostale uglove. Razlike se ogledaju u položaju lokalnih maksimuma kao i u vrednostima verovatnoće za određene uglove.



Slika 5.5 Funkcija gustine raspodele uglova incidencije dobijena pomoću DAMAS2 algoritma za 1/3 oktavni opseg 1250 Hz za: a) Lokaciju 1 (visina 1), b) Lokaciju 1 (visina 2), c) Lokaciju 5 (visina 1), d) Lokaciju 5 (visina 2)

Dve prethodno prikazane situacije pokazuju da postoje razlike između funkcija gustine verovatnoće uglova za istu mernu lokaciju za dve različite visine na koje se postavlja mikrofonski niz. Prikazani su rezultati samo za 1/3 oktavni opseg 1250 Hz, ali se i za ostale frekvencijske opsege mogu izvesti slični zaključci, što se može i videti u Prilogu 6. Razlike u visinama merenja su male, oko 1.5 m, pa ovi rezultati predstavljaju situacije sa najmanjim razlikama koje se mogu dobiti. Za veće razlike u visinama merenja očekuje se da razlike u oblicima dobijenih funkcija gustine verovatnoće budu veće od prikazanih u ovom odeljku. Na osnovu dobijenih razlika za raspodele uglova za različite visine zaključuje se da se potencijalno mogu javiti i razlike u ostvarenim

izolacionim moćima iste pregrade u istoj ulici za različite visine na koje se fasadna pregrada nalazi.

5.4 Algoritam za statističku analizu i kategorizaciju mernih lokacija

U savremenim komunikacionim sistemima, i nauci uopšte, petabajti (PB) višedimenzionalnih podataka postaju podrazumevana količina podataka kojoj je potrebno analitički pristupiti i potom obraditi. Kategorizacija velike količine podatak je jedan od zadataka koji se postavlja prilikom obrade podataka. Neretko je neophodno grupisati skup podataka na takav način da podaci koji pripadaju jednoj grupi budu po nekom kriterijumu sličniji jedni drugima nego podacima iz drugih grupa. Prilikom kategorizacije višedimenzionalnih podataka javlja se nekoliko problema. Veoma je teško razmišljati u više dimenzija, i gotovo nemoguće vizuelno predstaviti takve podatke. Takođe, sa velikim brojem dimenzija podataka postoji velika verovatnoća da su mnoge od njih korelisane, što dovodi do pogrešnog grupisanja podataka. U ovom poglavlju predstavljen je novi algoritam za kategorizaciju višedimenzionalnih podataka. Svodjenjem ulaznog skupa podataka na jednodimenzionalne podatke postiže se veća efikasnost i izbegvaju navedeni problemi prilikom obrade velike količine višedimenzionalnih podataka. Prikazani algoritam zasnovan je na ABCDepth algoritmu [62] koji izracunava višedimenzionalnu medijanu, na osnovu koje se višedimenzioni podaci svode na jednodimenzionalni skup.

U ovoj disertaciji višedimenzionalne podatke čine funkcije gustine verovatnoće ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke koje su frekvencijski zavisne. Kao i u ostalim poglavljima ove disertacije za analizu rezultata korišćeni su 1/3 oktavni frekvencijski opsezi. Ukupan broj mernih lokacija je 12, a broj frekvencijskih opsega je 10. Za potrebe algoritma za kategorizaciju podaci su raspodeljeni u 12 grupa, od kojih svaka grupa predstavlja lokaciju sa koje su se podaci prikupljali. Svaka od lokacija označena je sa L_i , gde je $i = 1, 2, \dots, 12$. Lokacije su predstavljene matricama dimenzija $m \times n$, gde je m broj uglova incidencije, a n broj frekvencijskih opsega u kojima su izvršena merenja. U ovoj disertaciji usvojeno je da su dimenzije matrice $m = 91$ i $n = 10$. Matrica L_i može se zapisati na sledeći način:

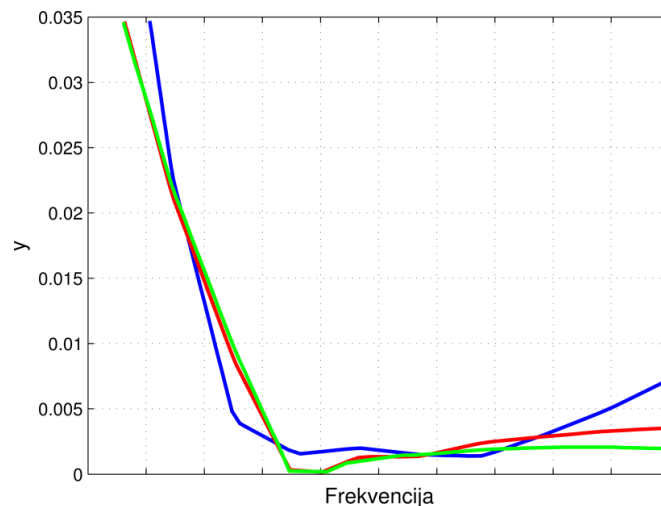
$$L_i = \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,m} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \cdots & x_{n,m} \end{pmatrix}, \quad 5.1$$

odnosno:

$$L_i = \{X_j\}, j = 1, 2, \dots, m; X_j = \{x_{k,j}\} i k = 1, 2, \dots, n; \quad 5.2$$

5.4.1 Prvi korak algoritma – izračunavanje medijane i distanci do medijane

Svaka lokacija L_i može se posmatrati kao skup od m funkcija (onoliko koliko ima uglova incidencije), odnosno $L_i = \{f_1(f_k, \theta_1), f_2(f_k, \theta_2), \dots, f_m(f_k, \theta_m)\}$, gde je $k = 1, \dots, n$. Na Slici 5.6 prikazane su funkcije $f_{18}(f_k, 18)$ za tri izabrane merne lokacije. Dve izabrane lokacije slične su po konfiguraciji terena, dok je treća lokacija ima značajno drugačiju konfiguraciju. Sa slike se uočava da funkcije prikazane crvenom i zelenom bojom imaju dobro poklapanje y vrednodsti, dok funkcija prikazana plavom bojom odstupa od prethodne dve.



Slika 5.6 Funkcije tri lokacije za $m = 18$

Na osnovu toga zaključuje se da su dve lokacije slične ukoliko imaju što više bliskih f_j funkcija. Postavlja se pitanje kako algoritamski konstantovati sličnost jasno vidljivu na

slici. Kako bi se smanjila kompleksnost ovog problema i postupak za pronalaženje kategorija sa sličnim lokacijama načinio efikasnim izvršen je postupak redukovanja broja dimenzija X_j podataka.

Upotrebom ABCDepth algoritma [62] izuzracunava se medijana za $\{X_j\}$ vektor iz svake lokacije i , odnosno:

$$med(L_1(X_j), L_2(X_j), \dots, L_i(X_j)), i = 1, 2, \dots, 12, j = 1, 2, \dots, m. \quad 5.3$$

Nakon toga, zarad smanjenja dimenzionalnosti, za svaki podatak $\{X_j\}$ iz lokacije L_i , racuna se distanca izmedju podatka X_j i medijane med_j , odnosno:

$$d_{ij} = dist(L_1(X_j), med_j). \quad 5.4$$

Time umesto m podataka dimenzije n dobijeno m podataka dimenzije 1, gde je svaki podatak X_j predstavljen svojom distancom. Dakle,

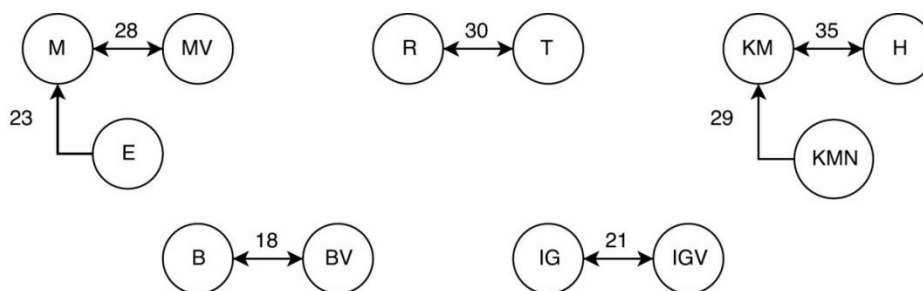
$$L_i = \{d_{i_1}, d_{i_2}, \dots, d_{i_j}\}, j = 1, 2, \dots, m. \quad 5.5$$

5.4.2 Drugi korak - kategorizacija distanci

Dobijeni set jednodimenzionih podataka za sve merne lokacije iz koraka 1 predstavlja ulazni set podataka za algoritam [63] na osnovu koga se vrši kategorizacija mernih mesta. Postupak je iterativni, odnosno iterativno se kategorizuje d_{i_1} distance iz svake lokacije L_i . Broj iteracija jednak je broju uglova incidencije (m), a u svakoj iteraciji ima maksimalno 12 kategorija. Maksimalan broj kategorija ostvaruje se u slučaju kada je svaka merna lokacija nezavisna kategorija. Drugim recima, u prvoj iteraciji kategorizovacemo distance $\{d_{1_1}, d_{2_1}, \dots, d_{12_1}\}$, u drugoj $\{d_{1_2}, d_{2_2}, \dots, d_{12_2}\}$ itd. U svakoj iteraciji lokacija se može pojaviti isključivo samo u jednoj kategoriji, što ne isključuje mogućnost da ce se u nekoj drugoj iteraciji pojaviti u razlicitoj kategoriji. Pojavljivanje distanci d_{i_j} u istoj kategoriji zapravo znaci da su vrednosti funkcija $f_j(f_k, \theta_j)$, za ugao

incidencije j , bliski medijani med_j za svaki frekvencijski opseg. To znači da im je razlika jako mala, kao u slučaju funkcija predstavljenih crvenom i zelenom bojom na Slici 1. Dakle, česta pojavljivanja lokacija u istoj kategoriji znače da su im funkcije često bliske, tj. da su lokacije slične, pa zbog čega čine jednu kategoriju. Kategorije dobijene u iteracijama nazane su kategorijama tipa C .

Posle završenih j iteracija, potrebno je prebrojati koliko se puta lokacija i našla u istoj kategoriji tipa C sa nekom drugom lokacijom. Na osnovu toga, izvršena je rekategorizacija lokacija. Nove kategorije nazvane su kategorijama tipa C_0 . Promena kategorija vrši se tako što lokaciju smeštamo u novu kategoriju tipa C_0 sa lokacijom sa kojom se najviše puta našla u kategoriji tipa C . U konkretnom slučaju, kategorizano je 12 lokacija. Imena lokacija, sa oznakama korišćenim u algoritmu su: Zgrada Molerova (M), Zgrada Molerova visina (MV), Ruzveltova (R), Karnegijeva (T), Kraljice Marije visina (KM), Kraljice Marije (KMN), Cara Nikolaja II (B), Cara Nikolaja II visina (BV), Ilije Garasanina (IG), Ilije Garasanina visina (IGV), Bulevar kralja Aleksandra bočno (E), Bulevar kralja Aleksandra (H). Nakon završenog drugog koraka, dobijen je grafički prikaz kategorija tipa C_0 kao na Slici 5.7.



Slika 5.7 Prikaz dobijenih kategorija u formi grafa povezanih komponenti

Sa slike se može uočiti da dobijena struktura predstavlja graf povezanih komponenti. Svaka povezana komponenta predstavlja jednu kategoriju tipa C_0 . U slučaju da se lokacija M našla najviše puta u kategoriji tipa C sa lokacijom MV, tada te dve lokacije čine kategoriju C_0 . Za graf povezanih komponenti važi relacija ekvivalencije, odnosno ako se lokacija M našla u kategoriji tipa C_0 sa lokacijom MV, a lokacija E sa lokacijom

M, tada lokacije M, MV i E cine jednu kategoriju tipa C₀. Dvosmerne strelice na Slici 5.7 pokazuju da su se lokacije M i MV najviše puta našle jedna sa drugom u kategoriji tipa C (28 puta). Jednosmerna strelica od lokacije E do lokacije M govori da se lokacija E našla najviše puta sa lokacijom M (23) puta. Relacija ekvivalencije važi i za druge slučajeve prikazane na Slici 5.7.

Da bi se proverio postupak kategorizacije prikazani algoritam je izvršen veliki broj puta i dobijeni su isti rezultati. Dodatno, za proveru rezultata izvršena je i kategorizacija rezultata dobijenih na mernim lokacijama ali za oktavne frekvencijske opsege. Funkcije gustine verovatnoće ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke dobije za 1/3 oktavne frekvencijske opsege transformisane su u oktavne opsege tako što su sabrane tri funkcije gustine verovatnoće koje odgovaraju istoj oktavi i tako dobijena vrednost podeljena je sa 3. Sa tako dobijenim podacima ponovljen je prikazani algoritam i dobijeni su isti rezultati kao na Slici 5.7. Na taj način potvrđena je tačnost rezultata i pokazano da kategorizacija ne zavisi od izbora frekvencijskog opsega korišćenih podataka sa mernih lokacija.

Primenom algoritma za kategorizaciju, prikazanog u ovom poglavlju, dobijeno je pet kategorija u kojima su se našle merne lokacije. Kategorizacija je izvršena na osnovu oblika ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke na fasadi zgrada za sve frekvencijske opsege. Kategorizacija dobjena na ovaj način povezana je sa konfiguracijom u kojoj se nalazi fasada na analiziranim mestima, odnosno sa profilom terena. Merna mesta u otvorenim ulicama sa velikim površinama ispred i iza saobraćajnice našla su se u istoj kategoriji. Ovu kategoriju čine merna mesta u Ruzveltovoj i Karnegijevoj ulici. Merna mesta u Ulici kraljice Marije i jedno merno mesto u Bulevaru kralja Aleksandra našla su se u istoj kategoriji, jer imaju istu konfiguraciju terena, naspram mernog mesta nema zgrada i široke saobraćajnice se nalaze u neposrednoj blizini fasade. Merna mesta u Molerovoj ulici, kao i jedno merno mesto u bulevaru kralja Aleksandra pripadaju istoj kategoriji. Ova kategorija sadrži ulice sa posebnim oblikom terena, kanjon ulice. Zasebnu kategoriju čine merna mesta u Ulici Ilije Garašanina jer nijedna od ostalih mernih lokacija nema sličan oblik terena. Ova merna mesta nalaze se u blizini saobraćajnice, ali u dolini, iznad koje se nalazi prometna ulica.

6 Proračun izolacione moći fasadnih pregrada

6.1 Uvod

Dometi u poboljšanju zvučne izolacije u zgradama su ograničeni kako mogućim fizičkim svojstvima pregrada, tako i finansijskim sredstvima koje racionalno treba uložiti u poboljšanje akustičkog komfora. Zbog toga se pitanje zvučne izolacije nameće kao važno u projektovanju i izgradnji svih vrsta objekata u kojima borave ljudi. Veza između buke, zvučne izolacije i akustičkog komfora definisana je ISO standardom [64], a dodatno definisanje obezbeđuju nacionalne regulative.

Standardi iz oblasti građevinske akustike definišu deskriptore zvučne izolacije i pojedinačnih građevinskih elemenata, kao i način za njihovo merenje [65]. Neki od deskriptora zvučne izolacije su [65]: izolaciona moć (R), zvučna izolovanost (D), nivo zvuka udara (L), doprinos obloge povećanju izolacione moći (ΔR), doprinos obloge smanjenju nivoa zvuka udara (ΔL) itd. Deskriptori su definisani u laboratoriskim i u terenskim (*in situ*) uslovima. Zbog frekvencijske zavisnosti zvuka kao fizičke pojave javlja se i frekvencijska zavisnost deskriptora zvučne izolacije. Tradicionalno, zvučna izolacija meri se u frekvencijskim opsezima 1/3 oktave od 100 Hz do 3150 Hz ili oktavnim opsezima od 125 Hz do 2000 Hz [66]. Vrednosti deskriptora za ove opsege date su u tabelama ili dijagramima. Zbog lakšeg definisanja i upotrebe kriterijuma za minimalno dozvoljene vrednosti zvučne izolacije definisane su jednobrojne (merodavne) vrednosti svih deskriptora.

Sa pojavom prvih zakonskih propisa koji su uveli minimalno potrebne kriterijume zvučne izolacije javila se potreba za definisanjem metoda za proračun vrednosti izolacije u budućim zgradama u fazi projektovanja. U početku ovi proračuni bili su opisni [67]. Prvi matematički model za proračun izolacije pregrada od vazdušnog zvuka bio je definisan za masivne pregrade i zasnovan na “zakonu mase” [68]. Pod pretpostavkom difuznog polja sa predajne strane, može se izračunati izolaciona moć pregrade [69]. Ovakva pretpostavka često ni u laboratorijskim uslovima nije ispunjena, pa dobijena vrednost deskriptora ne odgovara vrednosti dobijenoj merenjem. Detaljniji model za proračun dobijen je uvođenjem uticaja koincidencije na izolacionu moć [68]. Kasnije je proračun izolacije definisan standardom i danas se sa važećim ISO

standardima mogu dobiti vrednosti koje su približne vrednostima dobijenim merenjem [70].

U ovom poglavlju biće prikazan matematički model za proračun izolacione moći fasadnih pregrada od vazdušne buke. Model predstavlja kombinaciju proračuna pomoću ISO standarda i proračuna koji se mogu pronaći u literaturi. Prikazan je razvoj modela za proračun kroz istoriju kao i rezultati dobijeni uključivanjem pojedinih delova modela u proračun. Pošto je tema ove disertacije analiza uticaja raspodele spoljašnje buke na fasadnim pregradama u matematičkom modelu koriste se ugaone raspodele spoljašnje energije koja pogađa posmatranu fasadnu pregradu.

6.2 Izolaciona moć fasade

Izolaciona moć fasade, koja u opštem slučaju može biti sastavljena iz više elemenata, izračunava se na osnovu sledećeg izraza [71], [72]:

$$R = -10 \log \left(\sum_{i=1}^n \tau_{e,i} + \sum_{f=1}^m \tau_f \right), \quad 6.1$$

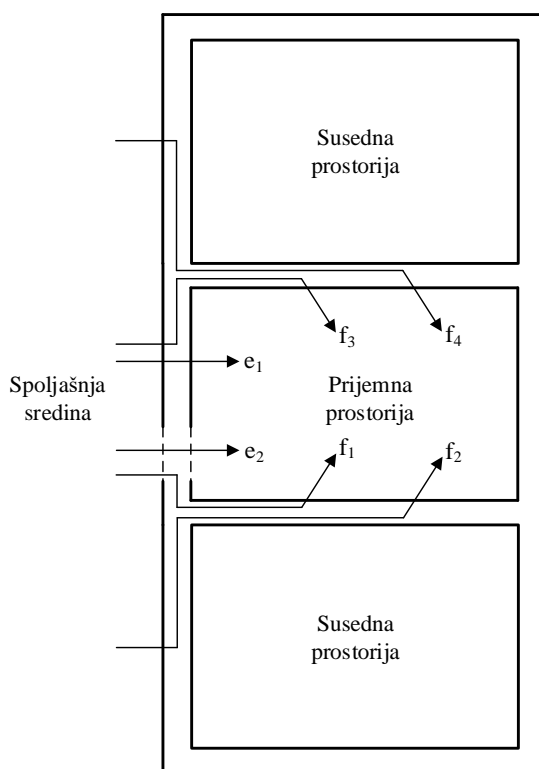
gde je:

- $\tau_{e,i}$ relativni odnos zvučne snage izračene direktno kroz elemente fasade u prijemnu prostoriju i ukupne incidentne zvučne snage koja pogađa fasadu;
- τ_f relativni odnos zvučne snage izračene kroz bočne elemente fasade u prijemnu prostoriju i ukupne incidentne zvučne energije koja pogađa fasadu;
- n broj elemenata fasade kroz koje direktno prolazi zvuk;
- m broj bočnih putanja kojima zvuk putuje do prijemne prostorije.

Na Slici 6.1 dat je uprošćen prikaz jedne karakteristične situacije u kojoj se može naći fasadna pregrada. Na slici su označene putanje kojima zvuk, odnosno spoljašnja buka, može doći do prijemne prostorije. Postoje dve direktne putanje zvuka kroz elemente fasade, označene na Slici 6.1 sa e . Jedna putanja predstavlja prolazak zvuka kroz zid, a druga kroz otvor na fasadi, koji u realnosti može biti prozor, vrata, ventilacioni otvor i sl. Na slici 6.1 su prikazane i četiri bočne putanje označene sa f . U ovoj situaciji nisu prikazane sve bočne putanje. Izostavljene su putanje kroz druge zidove prijemne prostorije čiji je doprinos u ukupnoj buci u prijemnoj prostoriji značajno manji u odnosu

na prikazane putanje. U realnosti se mogu javiti i drugačije putanje i ovaj slučaj predstavlja samo jedan mogući scenario. Na ovom scenariju, bez gubitka opštosti, biće prikazan način za proračun izolacione moći fasadne pregrade. Na ukupnu vrednost izolacione moći fasade najviše utiču direktne putanje (putanje označene sa e). Zbog toga je uvedena aproksimacija, koja u realnim situacijama može biti opravdana, da direktne putnje određuju vrednost izolacione moći, odnosno $\tau = \tau_e$ [73]. Izolaciona moć fasade R , izražena u decibelima (dB), izračunava se kao [68]:

$$R = -10 \log(\tau). \quad 6.2$$



Slika 6.1 Šematski prikaz putanja zvuka kroz fasadu

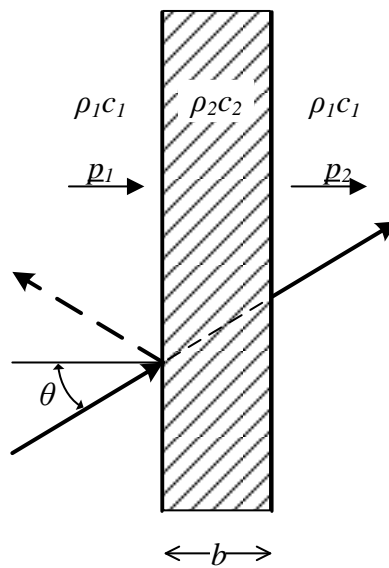
6.2.1 Koeficijent i impedansa transmisije

Direktnom putanjom zvuk u prijemnu prostoriju prolazi kroz elemente i pregrade za koje se smatra da su sačinjene od homogenih materijala. Vrednost izolacione moći je frekvencijski zavisna veličina, pa je potrebno proračun izolacione moći izvršiti za

frekvencijski opseg od interesa. Dodatno, vrednost izolacione moći pregrade zavisi i od ugaone raspodele zvučne energije koja pogađa pregradu. Na osnovu ove dve činjenice definisan je koeficijent transmisije pregrade $\tau(\omega)$ kao [7]:

$$\tau(\omega) = \sum_{k=0}^{\pi/2} \tau_k(\omega, \theta_k) p(\theta_k), \quad 6.3$$

gde je $\tau_k(\omega, \theta_k)$ koeficijent transmisije kroz pregradu koji se izračunava za sve frekvencije i jedan incidentni ugao zvučne energije, a $p(\theta_k)$ verovatnoća pojavljivanja zvučne energije za taj ugao. Incidentni uglovi se definišu u odnosu na normalu na pregradu [74]. Na Slici 6.2 prikazana je uprošćena beskonačno duga homogena pregrada, debljine b , koja se nalazi u vazduhu.



Slika 6.2 Homogena pregrada sa incidentnim ravanskim zvučnim talasom

Sa leve strane pregrade postoji zvučni pritisak p_1 , koji nastaje usled delovanja incidentnog ravanskog talasa koji pogađa pregradu pod određenim uglom. Sa desne strane pregrade postoji pritisak p_2 , koji nastaje usled transmitovanog zvučnog talasa kroz pregradu. Normalne komponente brzine sa obe strane pregrade su jednake, odnosno:

$$v_{n1} = v_{n2} = v_n, \quad 6.4$$

gde je [74]:

$$v_n = v \cos(\theta). \quad 6.5$$

Na osnovu izraza za specifičnu akustičku impedansu u vazduhu i relacije između ukupne brzine i normalne komponente brzine može se dobiti sledeća relacija [75]:

$$\frac{p_2}{v_n} = \frac{\rho c}{\cos \theta} \Rightarrow v_n = p_2 \frac{\cos \theta}{\rho c} \quad 6.6$$

Da bi se izračunao koeficijent transmisije same pregrade potrebno je uvesti veličinu koja povezuje brzinu i pritisak sa obe strane pregrade. Ta veličina naziva se impedansa transmisije z_τ i definisana je na sledeći način:

$$z_\tau = \frac{p_1 - p_2}{v_n} = \frac{p_1}{v_n} - \frac{p_2}{v_n} = \frac{p_1}{v_n} - \frac{\rho c}{\cos \theta}. \quad 6.7$$

Na osnovu toga veza pritiska sa dve strane pregrade data je sledećom jednačinom [68]:

$$p_1 = p_2 + p_2 \frac{\cos \theta}{\rho c} z_\tau. \quad 6.8$$

Koeficijent transmisije definiše se na sledeći način [76]:

$$\tau_k(\omega, \theta) = \left| \frac{p_2}{p_1} \right|^2 = \left| \frac{p_2}{p_2 + p_2 z_\tau \frac{\cos \theta}{\rho c}} \right|^2. \quad 6.9$$

Sređivanjem prethodnog izraza dobija se:

$$\tau_k(\omega, \theta) = \frac{1}{\left| 1 + z_\tau \frac{\cos \theta}{\rho c} \right|^2} \quad 6.10$$

Zbog postojanja specifične akustičke impedanse sa obe strane zida u imenilac prethodne jednačine dodaje se faktor 2, pa se konačno dobija izraz za koeficijent transmisije jednostruke homogene pregrade [77]:

$$\tau_k(\omega, \theta) = \frac{1}{\left| 1 + z_\tau \frac{\cos \theta}{2\rho c} \right|^2} \quad 6.11$$

6.2.2 Zakon mase

Za izračunavanje vrednosti koeficijenta transmisije potrebno je poznavati vrednost impedanse transmisije. Ova impedansa je u velikom broju slučajeva od interesa čisto imaginarna. Najjednostavnija aproksimacija koja se pojavljuje u literaturi za impedansu transmisije je ona kod koje je vrednost impedanse direktno srazmerna sa proizvodom vrednosti površinske mase pregrade (m') i ugaone frekvencije [68]:

$$z_\tau = j\omega m'. \quad 6.12$$

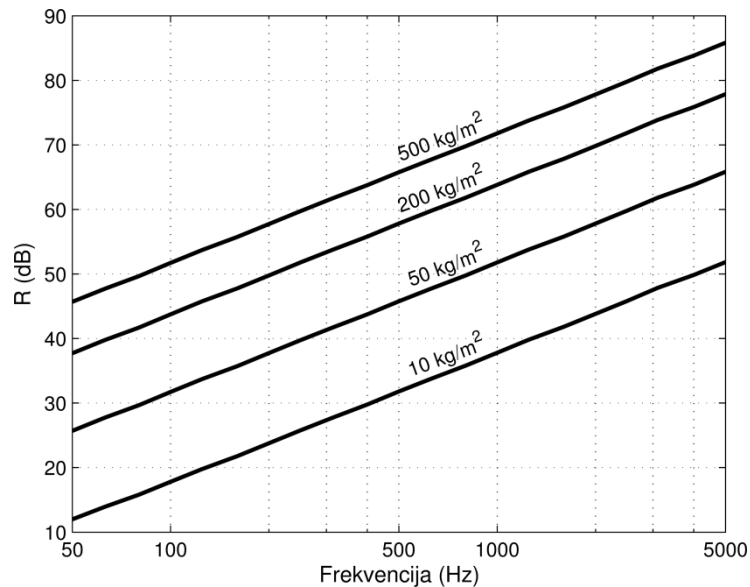
Na osnovu izraza 6.11 i prethodnog izraza dobija se konačan izraz za koeficijent transmisije:

$$\tau_k(\omega, \theta) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega m' \cos \theta}{2\rho c} \right)^2}, \quad 6.13$$

odnosno, izraz za izolacionu moć postaje [73], [7]:

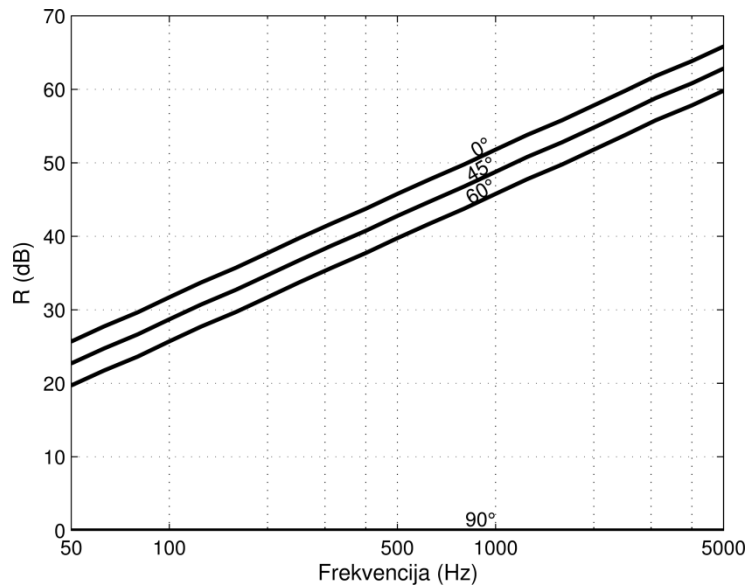
$$R(\omega, \theta) = 10 \log_{10} \left(1 + \left(\frac{\omega m' \cos \theta}{2\rho c} \right)^2 \right). \quad 6.14$$

Na Slici 6.3 prikazana je frekvencijska zavisnost vrednosti izolacione moći od površinske mase pregrade za incidentni ugao ravanskog zvučnog talasa od 0° , dok je na Slici 6.4 prikazana frekvencijska zavisnost izolacione moći pregrade od incidentnog ugla zvučnog talasa, za vrednost površinske mase $m' = 50 \text{ kg/m}^2$.



Slika 6.3 Frekvencijska zavisnost vrednosti izolacione moći od vrednosti površinske mase, za $\theta=0^\circ$

Iz izraza 6.14 sledi da je izolaciona moć direktno proporcionalna površinskoj masi pregrade i kosinusu incidentnog ugla zvučnog talasa, što se uočava sa Slika 6.3 i 6.4. Vrednosti površinskih masa su izabrane tako da odgovaraju vrednostima površinskih masa pregrada koje se koriste u građevinskoj praksi. Izradom pregrade od materijala čija je površinska masa veća, odnosno povećanjem debljine same pregrade ili gustine materijala, dobiće se veća vrednost izolacione moći pregrade. Povećanje površinske mase pregrade jedan je od načina da se poveća vrednost parametra R , međutim ovaj metod može imati praktična ograničenja uslovljena statikom objekta u kom se pregrada nalazi. Drugo ograničenje koje se javlja je smanjivanje površine prostorija u zgradama. Povećavanjem vrednosti upadnog ugla, posmatrano u odnosu na normalu upravnu na pregradu, smanjuje se vrednost izolacione moći. Najgori slučaj, po pitanju zvučne izolacije, javlja se kada incidentni talas nailazi pod uglom od 90° , odnosno paralelno sa pregradom. Tada je vrednost izolacione moći pregrade 0 dB, odnosno sva incidentna energija prolazi kroz pregradu, što se može videti i na Slici 6.4.

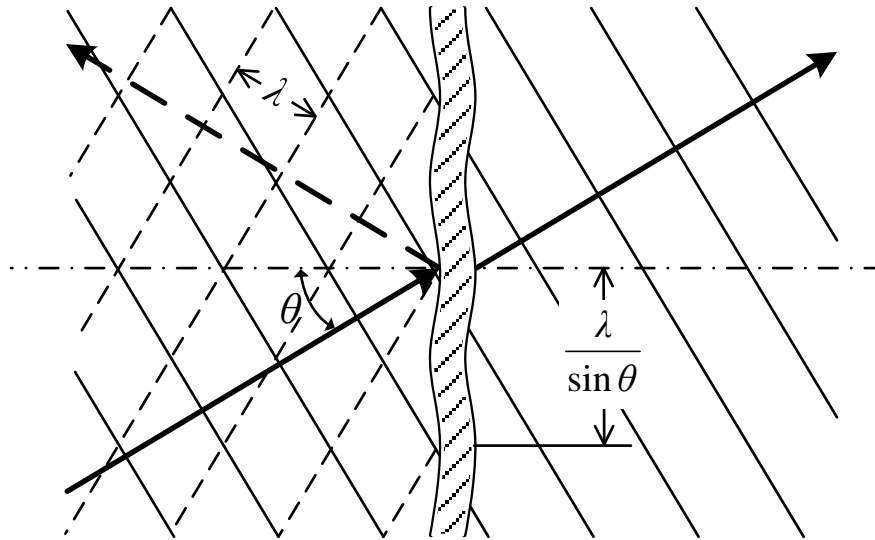


Slika 6.4 Frekvencijska zavisnost vrednosti izolacione moći od incidentnog ugla, za $m' = 50 \text{ kg/m}^2$

6.3 Uticaj koincidencije na izolacionu moć pregrade

Izrazom 6.11 pokazano je da vrednost izolacione moći fasadne pregrade zavisi od površinske mase i vrednosti upadnog ugla zvučnog talasa. U tom slučaju u obzir nisu uzete sve fizičke pojave koje se javljaju pri prostiranju zvuka kroz čvrstu homogenu pregradu. Efekat koji u velikoj meri utiče na vrednost koeficijenta transmisije, odnosno vrednosti izolacione moći pregrade, je pojava fleksionih talasa u pregradi koji nastaju kao posledica prinudnih oscilacija usled incidentne zvučne energije. Pojava fleksionih talasa u pregradi može značajno umanjiti vrednost izolacione moći pregrade ukoliko dođe do pojave koincidencije. Na Slici 6.5 prikazana je uprošćena situacija u kojoj se javlja efekat koincidencije. Beskonačna monolitna pregrada nalazi se u vazduhu i izložena je ravanskom zvučnom talasu čija je talasna dužina λ , i koji pogađa pregradu pod uglom θ . Deo incidentne zvučne energije se reflektuje, dok se deo zvučne energije transmituje kroz posmatranu pregradu. Fleksioni talas uprošćeno je prikazan pomoću zakrivljenja posmatrane pregrade. Može se desiti da oscilacije usled fleksionog talasa koincidiraju po mestu i vremenu sa oscilacijama komponente incidentnog zvučnog polja duž pregrade. Na osnovu toga, uslov za nastajanje efekta koincidencije je da talasna dužina fleksionog talasa postane jednaka količniku talasne dužine incidentnog ravanskog talasa i sinusa incidentnog ugla [78], odnosno:

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{\sin \theta}. \quad 6.15$$



Slika 6.5 Ilustracija efekata koincidencije kod monolitne pregrade

Posledica koincidencije je da se oscilacije pregrade pojačavaju i nastupa rezonanca, usled koje se zvučna energija prenosi gotovo bez gubitaka kroz pregradu, odnosno ostvaruje se totalna transmisija. Iz izraza 6.15 uočava se da uslov koincidencije može biti ispunjen za različite kombinacije frekvencija incidentnog talasa i incidentnog ugla. Brzina fleksionih talasa definisana je sledećim izrazom [74]:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad 6.16$$

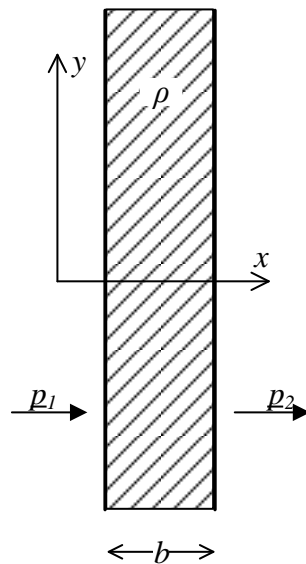
gde je E Jangov moduo elastičnosti materijala, a ρ gustina materijala. Talasna dužina fleksionih talasa u pregradi definisana je sledećim izrazom [78]:

$$\lambda_B = \sqrt{\frac{1.8 c_L h}{f}}, \quad 6.17$$

gde je h visina pregrade. Izjednačavanjem izraza 6.15 i 6.17 dobija se izraz za frekvenciju incidentnog talasa pri kojoj se javlja efekat koincidencije, koja se naziva još i frekvencija koincidencije f_c [68]:

$$f_c = \frac{c^2}{1.8c_L h \sin^2 \theta} \quad 6.18$$

Najniža frekvencija koincidencije javlja se za ugao $\theta=90^\circ$. Da bi se sagledao uticaj efekata incidencije na vrednost koeficijenta transmisije, odnosno na vrednost zvučne izolacije, potrebno je izvesti izraz za impedansu transmisije, uzimajući u obzir pojavu koincidencije. Na Slici 6.6 prikazani su usvojeni smerovi osa, korišćeni u narednom izvođenju.



Slika 6.6 Usvojeni smerovi osa za izvođenje

Deformacija koja nastaje po y -osi usled fleksionog talasa definisana je izrazom [79]:

$$\zeta = \frac{v}{j\omega} = \zeta_0 e^{j\frac{\omega}{c} \sin \theta y} \quad 6.19$$

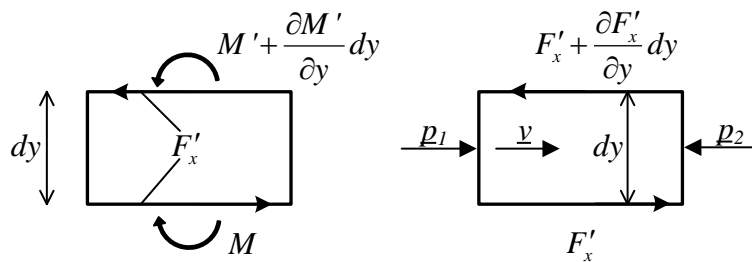
Moment savijanja po y -osi proporcionalan je sa drugim izvodom veličine deformacije po usvojenoj osi, odnosno:

$$M' = -B' \frac{d^2 \xi}{dy^2}, \quad 6.20$$

gde je B fleksiona krutost [78]. U ovom izvođenju koriste se gotovi izrazi izvedeni za šipke pravougaonog poprečnog preseka. Za slučaj zida, odnosno ploče, dimenzije debljina i širina nisu istog reda, pa se u oznakama koristi ' uz oznaku neke veličine, da bi se naglasilo da se odnosi na jednu dimenziju pregrade. Konstanta B' definiše se na sledeći način [78]:

$$B' = \frac{Eh^3b}{12(1-\mu^2)} = \frac{c_L^2 \rho h^3 b}{12(1-\mu^2)}, \quad 6.21$$

gde je μ Poasonov koeficijent materijala.



Slika 6.7 Segment zida sa označenim smerovima sila, momenata i pritisaka

Na osnovu Slike 6.7 definiše se jednačina ravnoteže sila na jednom segmentu zida, data sledećim izrazom [79]:

$$F'_x dy + \frac{\partial M'}{\partial y} dy = 0, \quad 6.22$$

pri čemu je:

$$F'_x = -\frac{\partial M'}{\partial y}. \quad 6.23$$

Na osnovu Slike 6.7 razlika pritisaka sa dve strane pregrade može se napisati kao:

$$p_1 - p_2 = j\omega m' v + \frac{\partial F'_x}{\partial y}. \quad 6.24$$

Vrednost parcijalnog izvoda x komponentne sile po y -osi dobijena je sledećim izvođenjem:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial F'_x}{\partial y} &= -\frac{\partial M''}{\partial y} = -\frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(-B' \frac{d^2 \zeta}{dy^2} \right) = \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[B' \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(\frac{v}{j\omega} \right) \right] = \\
 &= \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(\frac{B'}{j\omega} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = \frac{B'}{j\omega} \frac{d^4 v}{dy^4} = \frac{B'}{j\omega} \frac{\omega^4}{c^4} \sin^4 \theta v = \\
 &= \frac{B' \omega^3}{jc^4} \sin^4 \theta v.
 \end{aligned} \tag{6.25}$$

Četvrti izvod brzine po y -osi, koji se koristi u prethodnom izvođenju, dobijen je na sledeći način:

$$\begin{aligned}
 \frac{d^4 v}{dy^4} &= \frac{d^3}{dy^3} \left(j\omega \zeta_0 e^{j\frac{\omega}{c} \sin \theta y} \right) = \frac{d^3}{dy^3} \left[j\omega \zeta_0 e^{j\frac{\omega}{c} \sin \theta y} \left(j \frac{\omega}{c} \sin \theta \right) \right] = \\
 &= \frac{d^2}{dy^2} \left[j\omega \zeta_0 e^{j\frac{\omega}{c} \sin \theta y} \left(j \frac{\omega}{c} \sin \theta \right)^2 \right] = \frac{d}{dy} \left[j\omega \zeta_0 e^{j\frac{\omega}{c} \sin \theta y} \left(j \frac{\omega}{c} \sin \theta \right)^3 \right] = \\
 &= j\omega \zeta_0 e^{j\frac{\omega}{c} \sin \theta y} \left(j \frac{\omega}{c} \sin \theta \right)^4 = \frac{\omega^4}{c^4} \sin^4 \theta v.
 \end{aligned} \tag{6.26}$$

Na osnovu prethodnih izvođenja, konačan izraz za razliku pritisaka dat je sledećom relacijom [79]:

$$p_1 - p_2 = j\omega m' v + \frac{B' \omega^3}{jc^4} \sin^4 \theta v. \tag{6.27}$$

Ukoliko se obe strane prethodnog izraza podele sa brzinom, dobija se:

$$\frac{p_1 - p_2}{v} = j\omega m' + \frac{B' \omega^3}{jc^4} \sin^4 \theta, \tag{6.28}$$

odnosno, impedansa transmisije iznosi [68]:

$$z_\tau = j\omega m' + \frac{B' \omega^3}{jc^4} \sin^4 \theta. \tag{6.29}$$

Na osnovu vrednosti konstanti na osnovu kojih se dobija parametar B' , možemo izvršiti određene aproksimacije tako da se dobija:

$$B = \frac{Eh^3b}{12}; B' = \frac{Eh^3b}{12(1-\mu^2)} \Rightarrow B' \approx B. \quad 6.30$$

Na osnovu toga izraz 6.29 postaje:

$$z_\tau = j\omega m' + \frac{B\omega^3}{jc^4} \sin^4\theta. \quad 6.31$$

Na osnovu izraza 6.30, parametar B zavisi od Jangovog modula elastičnosti materijala, koji je u opštem slučaju kompleksan, i definiše se kao [78]:

$$\hat{E} = E(1 + j\eta), \quad 6.32$$

gde η predstavlja faktor gubitaka u materijalu. Kada se u izraz za impedansu transmisije unese kompleksna vrednost parametra E , dobija se izraz [68]:

$$z_\tau = \eta \frac{B\omega^3}{c^4} \sin^4\theta + j\omega m' + \frac{B\omega^3 m'}{jc^4} \sin^4\theta. \quad 6.33$$

Grupisanjem realnih i imaginarnih delova prethodnog izraza dobija se konačan izraz za impedansu transmisije u kom figuriše i efekat koincidencije [73]:

$$z_\tau = \eta \frac{B\omega^3}{c^4} \sin^4\theta + j \left(\omega m' - \frac{B\omega^3}{c^4} \sin^4\theta \right) \quad 6.34$$

Na osnovu izraza 6.11, koji povezuje impedansu transmisije zida i koeficijent transmisije, i prethodnog izraza potrebno je izvesti konačan izraz za koeficijent transmisije. Pre samog izvođenja potrebno je uvesti nekoliko izraza koji će biti od koristi pri samom izvođenju. Na osnovu izraza za (kružnu) frekvenciju koincidencije dobija se sledeći izraz [68]:

$$\omega_c = c^2 \sqrt{\frac{m'}{B}} = c^2 \sqrt{\frac{12m'}{Ebh^3}} = c^2 \sqrt{\frac{12m'}{c_L^2 \rho bh^3}}. \quad 6.35$$

gde važi da je:

$$m' = \rho bh \quad 6.36$$

Izraz za frekvenciju koincidencije, na osnovu izraza za kružnu učestanost, dat je sa:

$$f_c^2 = \frac{12m'c^4}{c_L^2 \rho b h^3 (2\pi)^2} \quad 6.37$$

Izvođenje koeficijenta transmisije prikazano je u nastavku.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau_k(\omega, \theta)} &= \left(\sqrt{\left(1 + \frac{1}{2} \eta \frac{B\omega^3 \cos \theta}{2\rho c^5} \sin^4 \theta\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{\omega m' \cos \theta}{\rho c} - \frac{1}{2} \frac{B\omega^3 \cos \theta}{\rho c^5} \sin^4 \theta\right)^2} \right)^2 = \\ &= \left(1 + \frac{1}{2} \eta \frac{B\omega^3 \cos \theta}{\rho c^5} \sin^4 \theta\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{\omega m' \cos \theta}{\rho c} - \frac{1}{2} \frac{B\omega^3 \cos \theta}{\rho c^5} \sin^4 \theta\right)^2 = \\ &= \left(1 + \frac{1}{2} \eta \frac{Ebh^3 \omega^3 \cos \theta}{12\rho c^5} \sin^4 \theta\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{\omega m' \cos \theta}{\rho c} - \frac{1}{2} \frac{Ebh^3 \omega^3 \cos \theta}{12\rho c^5} \sin^4 \theta\right)^2 = \quad 6.38 \\ &= \left(1 + \frac{1}{2} \eta \frac{c_L^2 b h^3 \omega^3 \cos \theta}{12\rho c^5} \sin^4 \theta\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{\omega m' \cos \theta}{\rho c} - \frac{1}{2} \frac{Ebh^3 \omega^3 \cos \theta}{12\rho c^5} \sin^4 \theta\right)^2 = \\ &= \left(1 + \eta \frac{\omega m'}{2\rho c} \left(\frac{f}{f_c}\right)^2 \cos \theta \sin^4 \theta\right)^2 + \frac{\omega^2 m'^2}{4\rho^2 c^2} \cos^2 \theta \left(1 - \left(1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2 \sin^4 \theta\right)\right)^2. \end{aligned}$$

Konačan izraz za koeficijent transmisije definisan je sledećim izrazom [68]:

$$\tau_k(\omega, \theta) = \left\{ \left[1 + \frac{\omega m'}{2\rho c} \eta \left(\frac{f}{f_c}\right)^2 \sin^4 \theta \cos \theta \right]^2 + \frac{\omega^2 m'^2 \cos^2 \theta}{4\rho^2 c^2} \left[1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2 \sin^4 \theta \right]^2 \right\}^{-1}. \quad 6.39$$

U prethodnom izrazu svi parametri, sem faktora gubitaka η , definisanisani su ili materijalom od koga je pregrada sačinjena ili su njihove vrednosti date izvedenim izrazima u ovom poglavlju. Faktor gubitaka u materijalu definisan je sledećim izrazom [66], [65]:

$$\eta = \eta_{\text{tot}} = \eta_{\text{int}} + \eta_e + 2\eta_r, \quad 6.40$$

gde je η_{int} faktor internih gubitaka, η_e faktor gubitaka usled prostiranja u susedne pregrade, a η_r faktor gubitaka usled zračenja u prostor. Ukupan faktor gubitaka mora se izračunati za konkretnu situaciju jer zavisi ne samo od posmatrane pregrade, već i od bočnih pregrada. Vrednost ukupnog faktora gubitaka data je sa [80]:

$$\eta = \eta_{\text{int}} + \frac{2\rho c\sigma}{2\pi f m'} + \frac{c}{\pi^2 S \sqrt{f f_c}} \sum_{k=1}^4 l_k \alpha_k, \quad 6.41$$

gde je:

- σ faktor zračenja fleksionih talasa;
- S površina bočnog elementa (izražena u m²);
- α_k koeficijent apsorpcije fleksionog talasa u k-tom elementu;
- l_k dužina zajedniče ivice sa bočnim elementom (izražena u metrima).

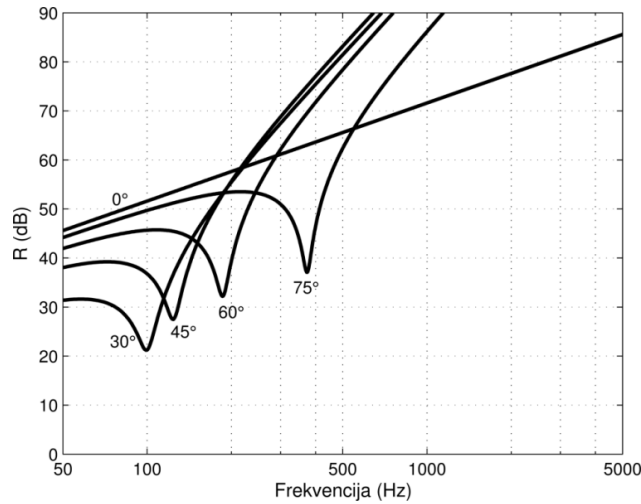
Prethodni izraz zahteva poznavanje vrednosti velikog broja parametara, koji su teško dostupni u relnosti. U Annex C relevantnog ISO standarda [66] izvedena je aproksimacija pomoću koje se olakšava izračunavanje vrednosti totalnih gubitaka u materijalu, koja važi za slučajeve $m' < 800$ kg/m, i data je sledećim izrazom [65]:

$$\eta_{\text{tot,lab}} \approx \eta_{\text{int}} + \frac{m'}{485\sqrt{f}}. \quad 6.42$$

Izraz za vrednost izolacione moći, koji zavisi od incidentnog ugla i frekvencije zvučnog talasa koji pogađa pregradu, u kom je uzet u obzir uticaj efekta koincidencije dat je sledećim izrazom [68]:

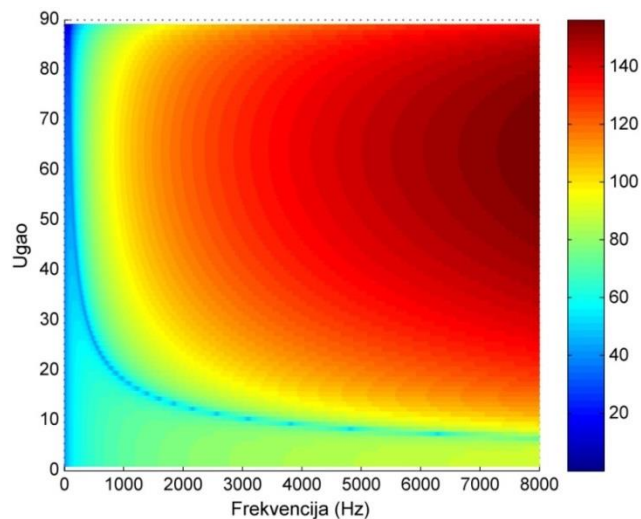
$$R(\omega, \theta) = 10 \log \left\{ \left[1 + \frac{\omega m'}{2\rho c} \eta \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \sin^4 \theta \cos \theta \right]^2 + \frac{\omega^2 m'^2 \cos^2 \theta}{4\rho^2 c^2} \left[1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \sin^4 \theta \right]^2 \right\}. \quad 6.43$$

Na Slici 6.8 prikazana frekvencijska zavisnost izolacione moći pregrade od betona debljine 20 cm i površinske mase 500 kg/m², dobijena na osnovu prethodnog izraza. Pored nabrojanih parametara za izračunavanje su potrebni i brzina fleksionih talasa i faktor internih gubitaka. Podaci o ovim veličinama za materijale koji se najčešće sreću u praksi dati su u Prilogu 7 [81]. Izračunavanje je ponovljeno za nekoliko incidentnih uglova zvučnog talasa. Sa slike se uočavaju minimumi u krivama izolacione moći, koji nastaju kao posledica efekta koincidencije. Lokacije minimuma se nalaze na različitim učestanostima za različite uglove, što se može uočiti u izrazu za uslov koincidencije.



Slika 6.8 Frekvencijska zavisnost izolacione moći, za beton sa $m' = 500 \text{ kg/m}^2$

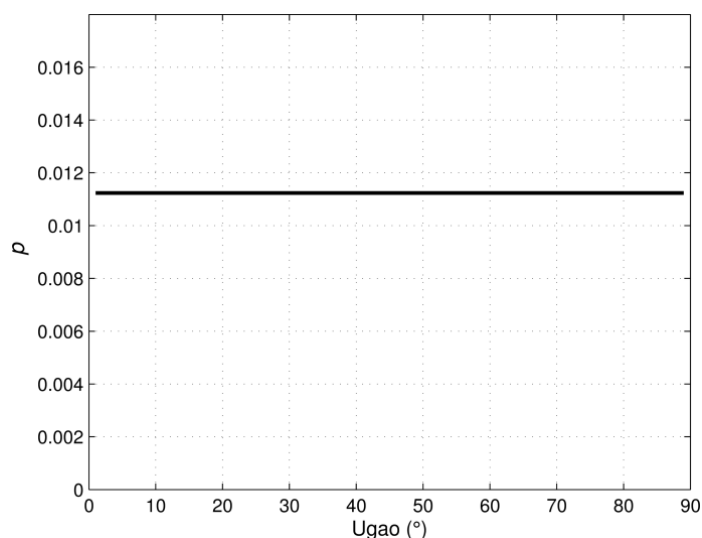
Na Slici 6.9 prikazan je trodimenzionalni dijagram zavisnosti vrednosti izolacione moći od ugla incidencije i frekvencije zvučnog talasa [82]. Vrednost izolacione moći predstavljena je bojama i tople boje na slici predstavljaju velike vrednosti ovog parametra. Sa slike se može uočiti da postoje zone u čitavom frekvencijskom opsegu u kojima je vrednost izolacione moći mala, odnosno bliska 0 dB. Ova pojava je direktna posledica uslova koincidencije i pojave frekvencija koincidencije za različite uglove incidencije zvučnog talasa.



Slika 6.9 Zavisnost vrednosti izolacione moći od ugla incidencije i frekvencije

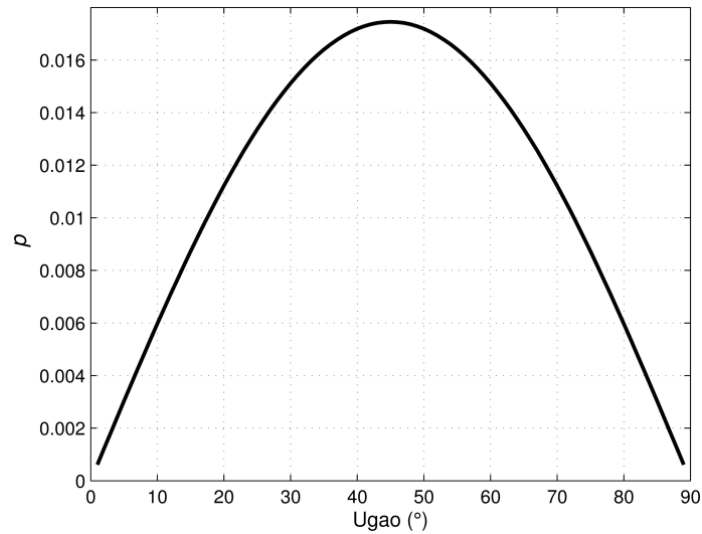
6.4 Raspodela uglova incidencije i izolaciona moć

U realnosti zvučni talas ne pogađa pregradu samo pod jednim uglom. Pojava da talasi pogađaju posmatranu pregradu pod svim uglovima između 0° i 90° je moguća i potrebno je poznavati verovatnoću pojave talasa iz određenih uglova. Verovatnoća pojave određenih uglova, odnosno ugaona raspodela incidentne energije nije poznata u realnosti. Moguća su određena uprošćavanja i aproksimacije kako bi se izračunala izolaciona moć pregrade za sve uglove incidencije istovremeno. Jedna od takvih pretpostavki je da je pojava svih uglova incidencije jednako verovatna, odnosno da je raspodela uglova uniformna. Na Slici 6.10 je prikazana funkcija gustine raspodele za uglove od interesa pri analizi izolacione moći fasada.



Slika 6.10 Uniformna gustina raspodele uglova

Jednako verovatna pojava zvučnih talasa na fasadi za sve uglove odgovara situaciji kada je uspostavljeno difuzno polje. Ovakva pretpostavka nije ispunjena u velikoj većini slučajeva u praksi. U literaturi [82] se mogu pronaći i druge raspodele, kojima se bolje aproksimiraju situacije u praksi. Jedna od takvih raspodela prikazana je na Slici 6.11.

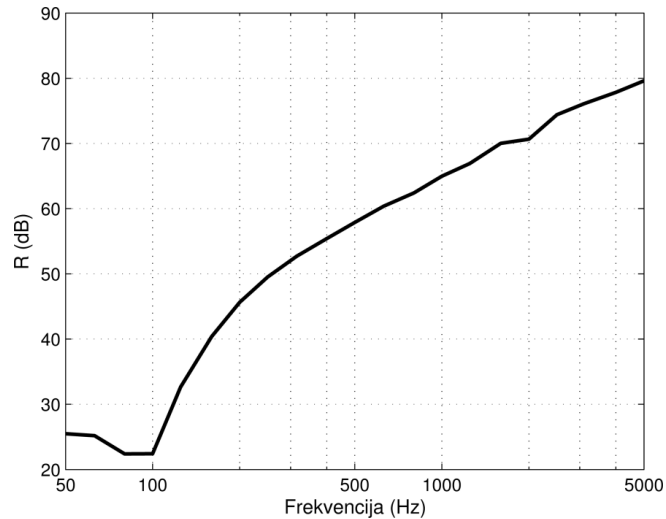


Slika 6.11 Gustina raspodele uglova $\sin(2\theta)$

Da bi se sagledao efekat verovatnoće uglova incidencije na vrednost izolacione moći potrebno je izračunati koeficijent transmisije koji u obzir uzima koeficijente transmisije za pojedinačne uglove. Ukupan koeficijent transmisije za sve uglove incidencije dobija se kao suma proizvoda svih koeficijenata transmisije za pojedinačne uglove i verovatnoće pojave talasa pod tim uglom [76], što je dato izrazom 6.3. Kada se izraz 6.14 uvrsti u izraz 6.3 dobija se konačan izraz za koeficijent transmisije:

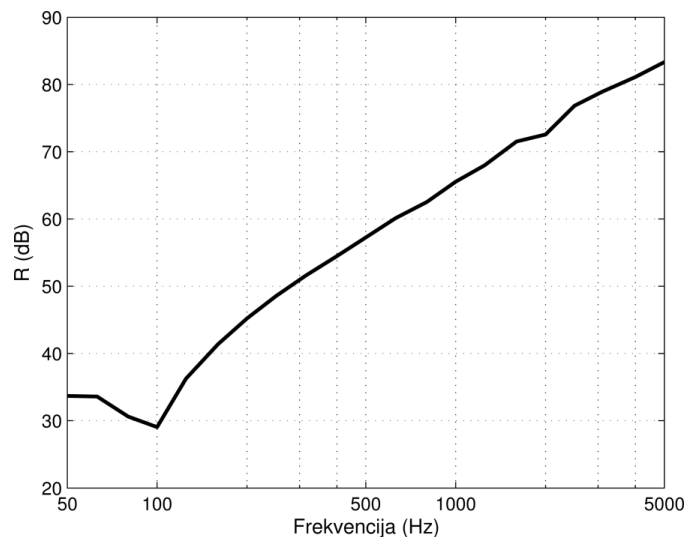
$$\tau(\omega) = \sum_{k=0}^{\pi/2} \frac{1}{\left(1 + \eta \frac{\omega m'}{2\rho c} \left(\frac{f}{f_c}\right)^2 \cos\theta \sin^4\theta\right)^2 + \frac{\omega^2 m'^2}{4\rho^2 c^2} \cos^2\theta \left(1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2 \sin^4\theta\right)^2} p(\theta_k) \quad 6.44$$

Na osnovu poslednjeg izraza dobija se vrednost izolacione moći pregrade. Obično je u praksi slučaj da se frekvencijska zavisnost izolacione moći ne posmatra za svaku pojedinačnu frekvenciju, već za terčne opsege. Na Slikama 6.12 i 6.13 prikazane su frekvencijske zavisnosti izolacione moći po terčnim opsezima, od terce 50 Hz do terce 5000 Hz, za slučajeve uniformne raspodele i raspodele $\sin(2\theta)$, respektivno. Proračun je izvršen za betonsku pregradu debljine 20 cm i površinske mase 500 kg/m². Sa slika se vidi da se vrednosti izolacionih moći razlikuju, čime je pokazano da raspodela uglova incidencije utiče na vrednost izolacione moći.



Slika 6.12 Izračunata vrednost izolacione moći pregrade pri uniformnoj raspodeli incidentnih uglova

Svođenjem vrednosti izolacione moći pregrade na terčne opsege dobija se set vrednosti kojim je pregrada opisana. Vrednost izolacione moći pregrade izražava se jednim brojem, zbog lakšeg opisivanja, klasifikacije, kao i zbog poređenja sa drugim pregradama. Standard ISO 717-1 [8] definiše referentnu krivu pomoću koje se izračunava jednobrojna vrednost za izolacionu moć pregrade. Jednobrojne vrednosti izolacione moći analizirane pregrade za slučaj uniformne i raspodele $\sin(2\theta)$ su 57 dB i 58 dB.



Slika 6.13 Izračunata vrednost izolacione moći pregrade pri raspodeli incidentnih uglova $\sin(2\theta)$

7 Proračun terenske izolacione moći fasadnih pregrada na osnovu sa eksperimentalno određenih ugaonih raspodela

7.1 Uvod

U poglavlju 6 je pokazano da izolaciona moć pregrade zavisi od upadnog ugla zvučnog talasa. Podaci o pregradama podrazumevaju uniformnu raspodelu incidentnih uglova, što odgovara stanju difuznog zvučnog polja u laboratorijskim komorama gde se po standardu vrši merenje izolacione moći [83]. Međutim, u ovom radu je eksperimentalno utvrđeno da se na fasadama zgrada u urbanoj sredini oblik raspodele incidentnih uglova zvučnih talasa razlikuje od onoga što karakteriše difuzno polje. Pri tome, oblik te raspodele zavisi od konfiguracije ulice, kao što je pokazano u poglavlju 5.

Da bi se utvrdio uticaj koji može imati varijacija ugaone raspodele incidentne energije na ispoljenu izolacionu moć fasadne pregrade izvršena je analiza proračunom. Za to je korišćen model prikazan u poglavlju 6. Izvršen je proračun izolacione moći koristeći ugaone raspodele dobijene prostorno-vremenskom obradom signala sa mikrofonskog niza. Ugaone raspodele spoljašnje buke na fasadi dobijene pomoću mikrofonskog niza prikazane su u poglavlju 5. U Prilogu 6 prikazani su oblici raspodela za sve frekventijske 1/3 oktavneopsege merna mesta obrađena u ovoj disertaciji.

Proračuni su sprovedeni za dve karakteristične materijalizacije pregrada koje se mogu javiti na fasadama u urbanim uslovima. To su:

- betonski zid debljine 16 cm, kao predstavnih masivnih pregrada, i
- pregrada od stakla debljine 5 mm, kao najslabiji element na fasadama.

Razlika između ove dve pregrade je pre svega u vrednostima površinske mase. Betonski zid ima mnogo veću vrednost površinske mase od pregrade napravljene od stakla i kao takav ispoljava veću vrednost izolacione moći u odnosu na staklenu pregradu. Razlika između dve izabrane pregrade je i u položaju frekvencije koincidencije materijala. Za staklenu pregradu frekvencija koincidencije se u oblasti visokih frekvencija, $f_{kr}=2700$ Hz, dok je za frekvencija koincidencije za izabranu betonsku pregradu $f_{kr}=120$ Hz. Takođe, za izabrane pregrade javljaju se razlike i u građevinskim parametrima, kao što su brzina prostiranja zvuka u materijalu, interni faktor gubitaka

itd, što se može videti u Prilogu 7. Sve nabrojane razlike između dve izabrane pregrade mogu u kombinaciji sa oblicima ugaone raspodele dovesti do različitih ponašanja pregrade na različitim mernim lokacijama u smislu ostvarene vrednosti izolacione moći. Rezultati klasifikacije prikazani u prethodnom poglavlju pokazali su da postoji pet kategorija u kojima su klasterizovane merne situacije na osnovu oblika eksperimentalno dobijenih raspodela ugaone energije. U ovom poglavlju analizirane su razlike između ostvarenih vrednosti izolacione moći za dobijene kategorije.

7.2 Metodologija proračun izolacione moći fasadne pregrade

Vrednost izolacione moći, data jednačinom 6.44, zavisi od građevinskih parametara pregrade ali i od ugaone raspodele incidentne energije koja pogađa fasadu. Raspodela koja se koristi u proračunu podrazumeva korišćenje samo normalne komponente ugaone raspodele incidentne energije, odnosno za proračun se zahteva svođenje ugaone raspodele na normalnu incidenciju. Ugaone raspodele dobijene na osnovu algoritama za prostorno-vremensku obradu signala sa mikrofonskog niza prikazane su u prethodnom poglavlju. Da bi se takve raspodele mogle koristiti za proračun vrednosti izolacione moći potrebno je izvršiti svođenje raspodela na normalu koja je upravna na ravan fasade. Zbog toga se sve funkcije gustine verovatnoće za sve frekvencijske opsege potrebno pomnožiti sa faktorom $\cos(\theta)$. Na osnovu jednačine 3.44, poznavajući građevinske karakteristike fasadne pregrade i ugaonu raspodelu za svaku frekvenciju, moguće je izračunati frekvencijsku zavisnost vrednosti izolacione moći fasadne pregrade. Međutim, funkcije gustine verovatnoće ugaone raspodele spoljašnje energije dobijene pomoću mikrofonskog niza izračunate su za 1/3 frekvencijske opsege i ne postoji podatak o raspodelama za svaku frekvenciju unutar 1/3 oktavnog opsega. Za izračunavanje vrednosti izolacione moći po matematičkom modelu iz trećeg poglavlja usvojena je aproksimacija da za sve frekvencije koje pripadaju istom 1/3 oktavnom opsegu važi ista funkcija gustine ugaone raspodele, izračunata za tu tercu. Ovakva aproksimacija unosi određenu grešku u proračun vrednosti izolacione moći. Međutim, posmatranjem promene rezultata lokalizacije zaključeno je da se za frekvencijske opsege od nekoliko Hz unutar jedne oktave rezultat ne menja u značajnoj meri. Mala razlika u rezultatu lokalizacije neće rezultovati velikom razlikom u dobijenoj funkciji

gustine verovatnoće, a samim tim i promenom vrednosti izračunate izolacione moći. Zbog toga se ova aproksimacija može smatrati opravdanom.

ISO standard, u kom je definisano izračunavanje izolacionih svojstava pregrada, definiše da se izračunavanja vrše za 1/3 oktavne opsege od 50 Hz do 3150 Hz [65]. Dizajnirani mikrofonski niz projektovan je za merenje u opsegu od 250 Hz do 2000 Hz, pa su zbog toga i rezultati algoritama za prostorno-vremensku obradu signala ograničeni na taj frekvencijski opseg. Zbog toga ugaone raspodele raspodele incidentne energije nije moguće izračunati za opseg od 50 Hz do 250 Hz, kao i za opseg od 2000 Hz do 3150 Hz. Da bi se omogućilo izračunavanje u frekvencijskom opsegu koji je definisan standardom usvojena je pretpostavka da se za 1/3 oktavni opsezi manji od 250 Hz koriste iste raspodele kao 1/3 oktavni opseg 250 Hz. Takođe, usvojeno je da su raspodele za frekvencije veće od 2000 Hz iste kao raspodela za 1/3 oktavni opseg 2000 Hz. Na osnovu usvojenih pretpostavki definisane su funkcije gustine raspodele za svaku frekvenciju između 50 Hz i 3150 Hz. Prikazivanje frekvencijske zavisnosti vrednosti izolacione moći standardizovano je kao prikaz vrednosti za 1/3 oktavne opsege. To znači da je nakon izračunavanja izolacione moći za sve frekvencije potrebno izračunati vrednosti izolacione moći po 1/3 oktavnim opsezima.

Da bi se sagledao uticaj ugaonih raspodela izabrane su dve vrste fasadnih pregrada za koje će biti izvršen proračun izolacione moći po modelu prikazanom u poglavlju 6. Građevinski podaci koji su korišćeni za proračun vrednosti izolacione moći fasadnih pregrada dati su u Prilogu 7. Dve korišćene fasadne pregrade izabrane su jer se najčešće javljaju kao fasadni elementi u urbanim sredinama. Na ovaj način mogu se sagledati razlike u ostvarenoj izolacionoj moći istih pregrada u različitim konfiguracijama terena i na osnovu toga potencijalno utvrditi veze između vrednosti ostvarene izolacione moći i profila terena u kom se fasadna pregrada nalazi.

7.3 Rezultati proračuna fasadnih pregrada

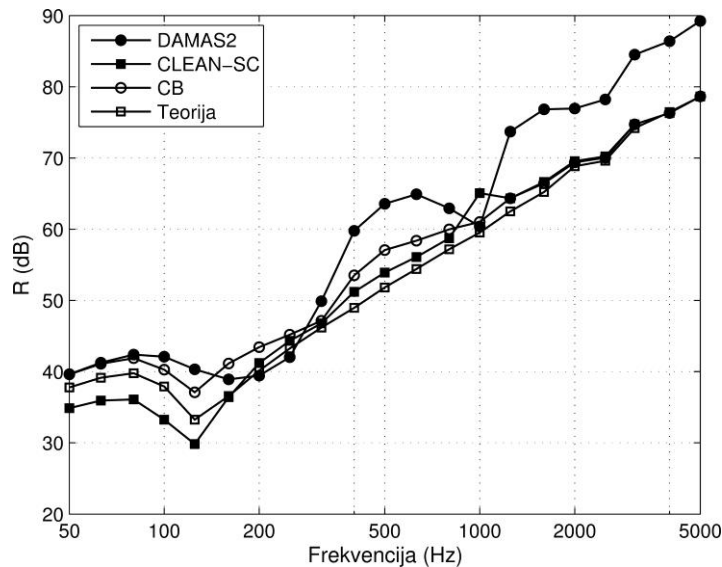
Na osnovu rezultata algoritama za lokalizaciju za sve merne lokacije utvrđena je distribucija zvučne energije u prostoru ispred fasade, na osnovu čega je izračunata ugaona raspodela spoljašnje energije na fasadi. Da bi se sagledao uticaj profila terena na vrednost ostvarene izolacione moći pregrade u ovom poglavlju prikazani su rezultati

proračuna izolacione moći dve vrste fasadnih pregrada na osnovu eksperimentalno određenih raspodela za različite lokacije, kao i za različite visine postavljanja mikrofonskog niza.

7.3.1 Uporedna analiza proračuna za različitih algoritama za lokalizaciju

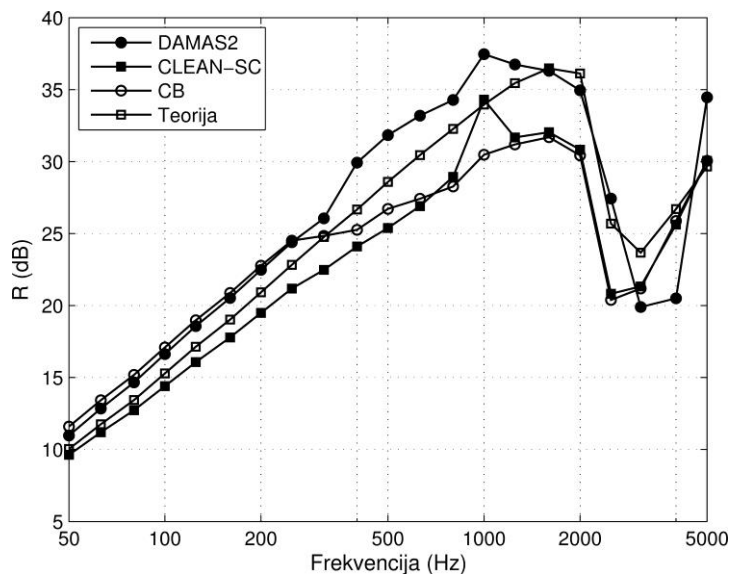
Za lokalizaciju zvučnih izvora u prostoru korišćeni su algoritmi CB, CLEAN-SC i DAMAS2. Način dobijanja ugaone raspodele incidentne energije iz rezultata lokalizacije opisan je u poglavlju 5. Na Slici 7.1 prikazane su frekvencijske zavisnosti izolacione moći betonske pregrade debljine 16 cm izračunate sa eksperimentalno dobijenim raspodelama, kao i izolaciona moć dobijena na osnovu teorijske raspodele $\sin(2\theta)$. Prilikom proračuna sa teorijskom raspodelom usvojeno je da za svaku frekvenciju važi navedena raspodela. Korišćene su funkcije gustine verovatnoće uglova dobijene za Lokaciju 1, odnosno ulicu cara Nikolaja II. Na osnovu slike zaključuje se da postoji razlika u vrednostima izolacione moći dobijenih na osnovu rezultata različitih algoritama. Krive dobijene pomoću CB i CLEAN-SC algoritama približno se poklapaju, osim i oblasti niskih frekvencija, ispod 150 Hz, gde razlika iznosi do 3 dB. Sličnost između vrednosti izolacionih moći posledica je sličnosti eksperimentalno dobijenih raspodela na osnovu ova dva algoritma. Vrednosti izolacione moći betonske pregrade dobijene sa raspodelama izračunatim na osnovu rezultata DAMAS2 algoritma odstupaju u velikoj meri u celom frekvencijskom opsegu od rezultata dobijenog sa druga dva algoritma. Razlike na pojedinim frekvencijama iznose i do 13 dB, što predstavlja veliku razliku, posmatrano u odnosu na vrednost izolacione moći.

Vrednosti izolacione moći dobijene na osnovu teorijske raspodele ugaone energije su najmanje u odnosu na ostale prikazane vrednosti. Najveće vrednosti izolacione moći dobijaju se koristeći ugaone raspodele energije dobijene na osnovu DAMAS2 algoritma. To znači da betonska pregrada čija je vrednost proračunata na osnovu teorijske raspodele ima manju izolacionu moć nego betonska pregrada istih karakteristika ugrađena na Lokaciji 1.



Slika 7.1 Frekvencijska zavisnost vrednosti izolacione moći betonske pregrade debljine 16 cm za Lokaciju 1, dobijena na osnovu raspodela određenih sa tri algoritma za obradu signala

Na Slici 7.2 prikazana je frekvencijska zavisnost vrednosti izolacione moći staklene pregrade debiljne 5 mm, dobijene na osnovu ugaonih raspodela koje su izračunatih pomoću algoritama za lokalizaciju na Lokaciji 1. Pored toga prikazana je i frekvencijska zavisnost vrednosti izolacione moći dobijena proračunom sa teorijskom raspodelom $\sin(2\theta)$. Sa slike se može uočiti da između vrednosti izolacione moći dobijenih sa CB i CLEAN-SC algoritmima postoje veće razlike u odnosu na slučaj betonske pregrade. Razlike su najveće u oblasti iznad 400 Hz i iznose oko 10 dB. Za frekvencije manje od 400 Hz razlike između ove dve krive su zanemarljivo male. Vrednosti izolacione moći koja je dobijena pomoću teorijske raspodele nisu manje od svih vrednosti dobijenih na osnovu eksperimentalno dobijenih raspodela, za razliku od slučaja sa betonskom pregradom. Najveća vrednost izolacione moći staklene pregrade dobija se kada se u proračunu koristi ugaona raspodela incidentne energije dobijena na osnovu rezultata DAMAS2 lokalizacionog algoritma. Međutim na visokim frekvencijama, u oblasti oko frekvencije koincidencije stakla, vrednosti izolacione moći dobijene pomoću DAMAS2 algoritma imaju nešto niže vrednosti od teorijske raspodele.

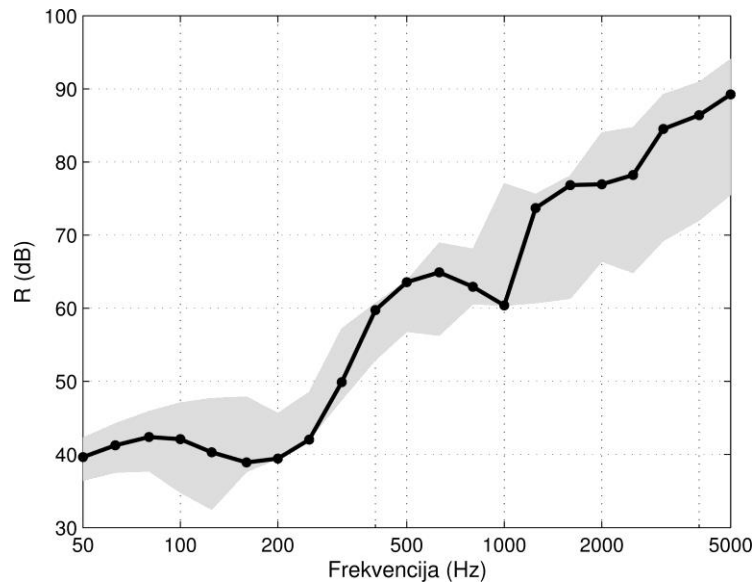


Slika 7.2 Frekvencijska zavisnost vrednosti izolacione moći staklene pregrade debljine 5 mm za Lokaciju 1, dobijena na osnovu raspodela određenih sa tri algoritma za obradu signala

Na osnovu rezultata dobijenih za betonsku i za staklenu pregradu zaključuje se da se vrednosti izolacione moći razlikuju za različite algoritme. Pošto je u prethodna dva poglavlja pokazano da se pomoću algoritma DAMAS2 dobijaju rezultati lokalizacije koji se poklapaju sa situacijom u realnosti, izolacione moći izračunate pomoću ovog algoritma izabrane su za dalje analize i izvođenje zaključaka. Takođe, zaključuje se i da se usled različitosti materijala i njegove debljine mogu javiti različiti trendovi u promenama vrednosti izolacione moći.

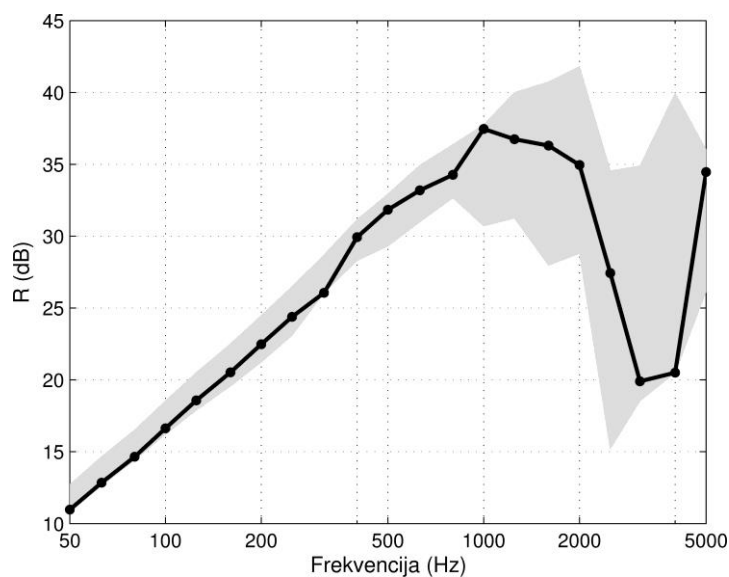
7.3.2 Uporedna analiza proračuna za različite merne lokacije

U ovom odeljku prikazani su rezultati proračuna izolacione moći na osnovu ugaonih raspodela incidentne energije za različite merne lokacije, dobijene na osnovu algoritma DAMAS2. Izvršeni su proračuni za dve različite pregrade, betonsku debljine 16 cm i pregradu od stakla debljine 5 mm. U ovom odeljku prikazani su karakteristični slučajevi dok se rezultati proračuna za sve lokacije nalaze u Prilogu 8.



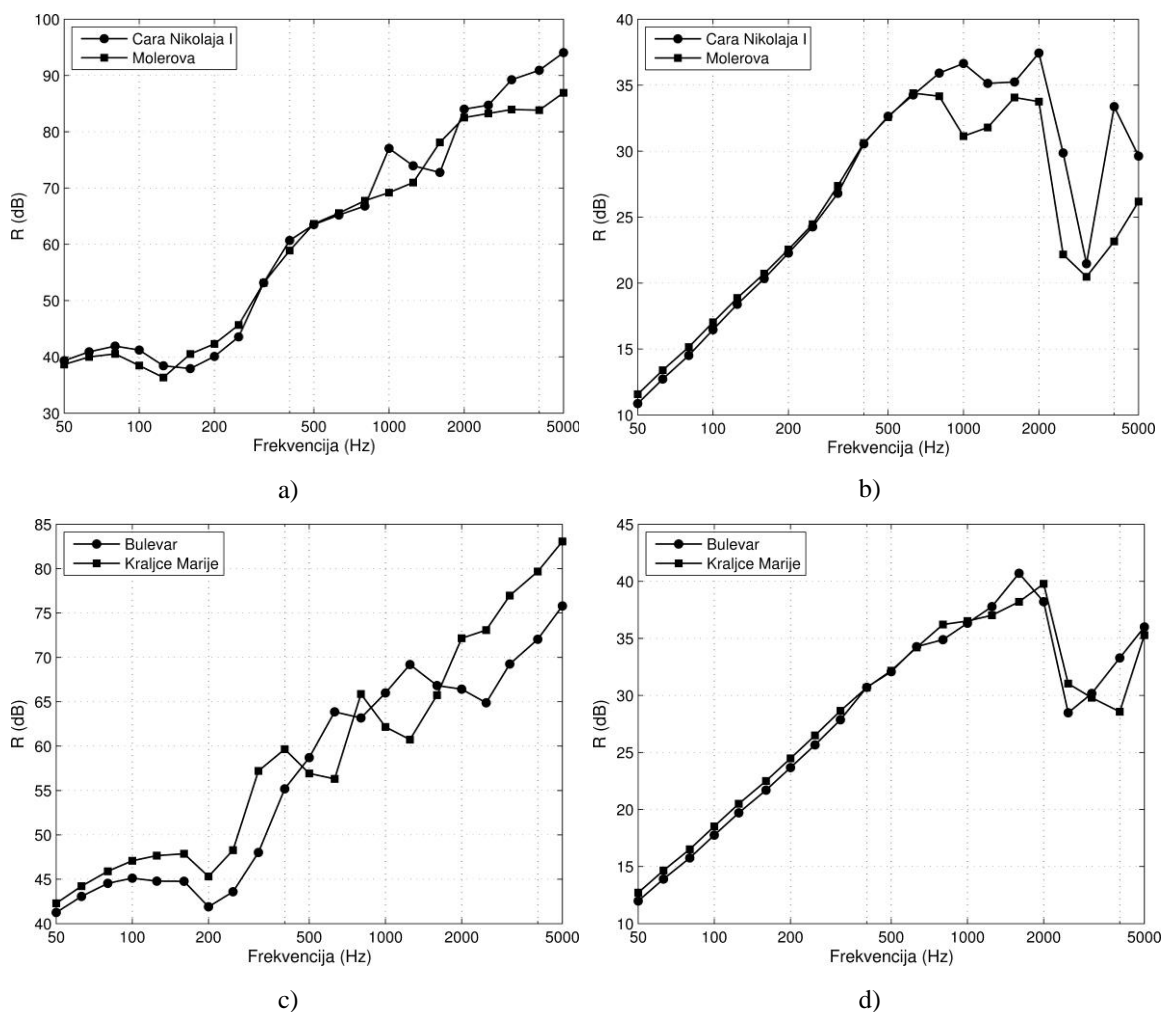
Slika 7.3 Frekvencijska zavisnost vrednosti izolacione moći betonske pregrade debljine 16 cm za Lokaciju 1, izračunata na osnovu algoritma DAMAS2, sa odstupanjima u odnosu na rezultate sa ostalih lokacija

Na Slici 7.3 prikazana je frekvencijska zavisnost vrednosti izolacione moći betonske pregrade izračunata na osnovu eksperimentalno dobijenih ugaonih raspodela incidentne energije na Lokaciji 1. Sivom bojom prikazana su odstupanja između vrednosti izolacione moći dobijenih na osnovu proračuna sa eksperimentalno dobijenim raspodelama za svih 12 mernih lokacija koje su obrađene u ovoj disertaciji. Sa slike se uočava da postoje velike razlike između vrednosti izolacione moći za različite merne lokacije. Na niskim frekvencijama pojavljuju se razlike do 13 dB, dok su razlike na visokim frekvencijama još veće. Najveća razlika javlja se za 1/3 oktavni opseg 2500 Hz i iznosi 20 dB. Prikazane razlike u vrednostima izolacionih moći su veoma velike, što znači da će postojati značajne razlike u izolacionim svojstvima iste pregrade na različitim lokacijama.



Slika 7.4 Frekventijska zavisnost vrednosti izolacione moći staklene pregrade debljine 5 mm za Lokaciju 1, izračunate na osnovu algoritma DAMAS2, sa odstupanjima u odnosu na rezultate sa ostalih lokacija

Na Slici 7.4 prikazana je frekventijska zavisnost vrednosti izolacione moći staklene pregrade izračunata po modelu iz poglavlja 6, sa eksperimentalno dobijenim raspodelama na Lokaciji 1. Na niskim frekvencijama razlike između izolacionih moći izračunatih za različite lokacije je manja u odnosu na slučaj betonske pregrade. Odstupanja u vrednostima na niskim frekvencijama su oko 2 dB. Na frekvencijama većim od 1000 Hz razlike između vrednosti izolacionih moći za različite lokacije se povećavaju. Najveće razlike javljaju se u oblasti frekvencije koincidencije stakla, na 2500 Hz, i iznose oko 20 dB. Ova razlika je manja u odnosu na razliku koja se javlja kod betonske pregrade. Međutim, vrednost izolacione moći stakla je mnogo manja kod betonske pregrade pa ova vrednost razlike ima veći uticaj na izolaciona svojstva staklene pregrade. Minimalna vrednost izolacione moći koja se javlja na Slici 7.4 je 15 dB. To znači da će za vrednost spoljašnje buke od 80 dB na toj frekvenciji u prostoriji čija je fasada staklena iznositi od oko 65 dB, što predstavlja veoma veliku vrednost buke.



Slika 7.5 Frekvencijska zavisnost vrednosti izolacione moći a) betonske pregrade debljine 16 cm za Lokaciju 1 i Lokaciju 5, b) staklene pregrade debljine 5 mm za Lokaciju 1 i Lokaciju 5, c) betonske pregrade debljine 16 cm za Lokaciju 3 i Lokaciju 7, d) staklene pregrade debljine 5 mm za Lokaciju 3 i Lokaciju 5

Na Slici 7.5 prikazani su rezultati proračuna vrednosti izolacione moći betonske i staklene pregrade na osnovu raspodela ugaone energije spoljašnje buke koja je eksperimentalno utvrđena. Kao i u prethodna dva poglavlja izabrane su karakteristične konfiguracije terena za koje je izvršeno poređenje rezultata proračuna vrednosti izolacione moći. Na Slici 7.5 a) prikazane su izračunate izolacione moći betonske pregrade za lokacije koje odgovaraju Ulici cara Nikolaja II i Molerovoj ulici. Ove dve merne lokacije pripadaju različitim kategorijama, dobijenim u poglavlju 5. Razlike u raspodelama za ove dve merne lokacije dovode do razlika u ostvarenim izolacionim moćima betonske pregrade. Razlike između dve vrednosti izolacione moći iznose oko

2 dB na frekvencijama manjim od 250 Hz. Na frekvencijama između 250 i 2500 Hz razlike gotovo da ne postoje, osim u 1/3 oktavnom opsegu 1000 Hz. Izolacione moći izračunate za ove dve situacije na frekvencijama iznad 2500 Hz razlikuju se za oko 7 dB, što predstavlja najveće razlike između posmatranih krivih. Na osnovu standarda ISO 717 moguće je na osnovu vrednosti izolacione moći za 1/3 oktavne opsege izračunati merodavnu (jednbrojnu) vrednost izolacione moći [8]. Kada izračunaju jednbrojne vrednosti izolacione moći dobija se vrednost od 59 dB za betonsku pregradu u Molerovoj ulici, dok se za Ulicu cara Nikolaja II dobija vrednost 58 dB.

Na Slici 7.5 b) prikazani su rezultati proračuna izolacione moći za staklenu pregradu sa eksperimentalno dobijenim raspodelama sa Lokacije 1 i Lokacije 5. Razlike između izračunatih izolacionih moći ne postoje na frekvencijama manjim od 500 Hz. Međutim na frekvencijama iznad 500 Hz postoje razlike gotovo u svim 1/3 oktavnim opsezima koje iznose oko 7 dB. Na visokim frekvencijama na Lokaciji 5 postoji izražena pojava reflektovane energije od fasada naspramnih zgrada, koja ne postoji na Lokaciji 1, što se može videti iz rezultata prikazanih u poglavlju 4. Pojava reflektovane energije na jednoj i njen izostanak na drugoj mernoj lokaciji dovodi do razlike u oblicima raspodela za frekvencijske opsege iznad frekvencije 500 Hz, a zatim i do pojave razlika i u ostvarenim izolacionim moćima. Ova pojava javlja se i u slučaju betonske pregrade, ali je zbog građevinskih karakteristika betona razlika u izolacionim moćima manja. Frekvencija koincidencije stakla ove debljine nalazi se u oblasti najvećih razlika u raspodelama između dve lokacije, pa je razlika u ostvarenim izolacionim moćima veća u odnosu na betonsku pregradu čija je frekvencija koincidencije na niskim frekvencijama. Razlike koje su se javile u nekoliko opsega dovele su do toga da postoji i razlika u jednbrojnim vrednostima za ove dve krive. Staklena pregrada u Ulici cara Nikolaja II ima jednbrojnu vrednost 32 dB, dok u Molerovoj ulici ista pregrada ima jednbrojnu vrednost izolacione moći 30 dB.

Na Slici 7.5 c) prikazan je rezultat proračuna izolacione moći betonske pregrade debljine 16 cm na osnovu eksperimentalno dobijenih ugaonih raspodela incidentne energije na Lokacijama 3 i 7. Sa slike se uočavaju razlike u dobijenim vrednostima izolacione moći betonske pregrade koja se nalazi u Ulici kraljice Marije i Bulevaru kralja Aleksandra. Razlike na niskim frekvencijama su do 3 dB, dok se razlika povećava

na visokim frekvencijama i za pojedine 1/3 oktavne opsege iznosi 9 dB. Razlog za povećavanje razlike na visokim frekvencijama je postojanje reflektovane energije na Lokaciji 3, koja ne postoji na Lokaciji 7, što se može videti iz rezultata lokalizacije prikazanim u poglavlju 4 i Prilogu 5. Razlika se odražava i na jednobrojnu vrednost izolacione moći betonske pregrade. Međutim, postoje i negativne i pozitivne vrednosti razlike u izolacionim moćima, pa se neće javiti velika razlika u jednobrojnim vrednostima izolacione moći za ove dve merne situacije. Jednobrojna vrednost iznosi 59 dB za situaciju na lokaciji 3, dok na lokaciji 5 jednobrojna vrednost iznosi 60 dB. Obe vrednosti su veće od jednobrojne vrednosti izolacione moći betonske pregrade proračunate na osnovu raspodele $\sin(2\theta)$.

Na slici 7.5 d) takođe je prikazan rezultat proračuna izolacione moći na lokacijama 3 i 5, ali za slučaj staklene pregradu debljine 5 mm. Vrednosti izolacionih moći na frekvencijama manjim od 1000 Hz se razlikuju veoma malo, dok se iznad ove frekvencije pojavljuju razlike ne veće od 4 dB. U odnosu na betonsku pregradu razlike koje se javljaju za pregradu od stakla su mnogo manje. Razlike koje se javljaju na visokim frekvencijama su posledica reflektovane energije. Međutim ove razlike nisu toliko velike da bi dovele do razlika u jednobrojnoj vrednosti izolacione moći staklene pregrade za situacije kada je ugrađena u Bulevaru kralja Aleksandra i Ulici kraljice Marije. Jednobrojna vrednost u obe situacije iznosi 34 dB.

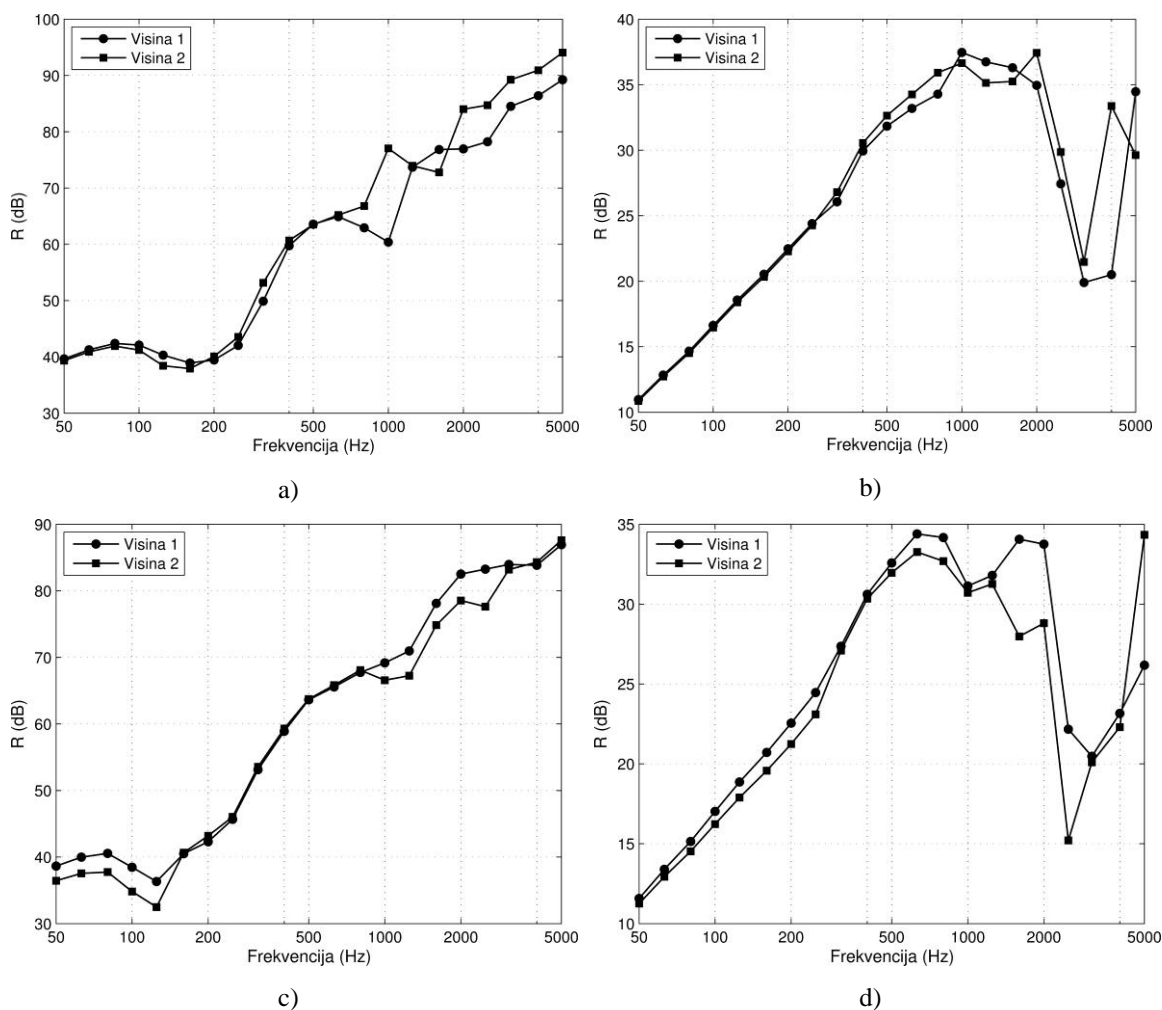
Analizirani slučajevi pokazuju da ista fasadna pregrada ispoljava različita izolaciona svojstva u zavisnosti od lokacije na koju je ugrađena. Pošto su vrednosti građevinskih parametara u modelu za proračun iste i jedina promenljiva veličina za različite lokacije je raspodela zaključuje se da profil terena utiče na vrednost ostvarene izolacione moći analizirane pregrade. Takođe, uticaj ugaone raspode energije nije isti za svaku pregradu već zavisi i od građevinskih karakteristika samog materijala. Uticaj raspodele najveći je u oblasti frekvencije koincidencije materijala i tu se mogu javiti velike razlike između ostvarenih izolacionih moći na različitim lokacijama. Zbog toga je potrebno analizirati različite vrste pregrada da bi se doneo generalni zaključak o uticaju profila terena na ostvarenu vrednost izolacione moći. Ostvarene vrednosti izolacione moći veće su za sve merne lokacije i sve vrste pregrada proračunate na osnovu eksperimentalnih raspodela u odnosu na proračun sa teorijskom raspodelom $\sin(2\theta)$. To znači da će pregrada koja je

ugrađena na fasadu zgrade u urbanim uslovima imati veće ostvarene vrednosti od onih koje su izmerene u laboratoriji, gde je raspodela polja uniformna.

7.3.3 Uporedna analiza proračuna za različite visine mikrofonskog niza

Na Slici 7.6 a) prikazani su rezultati proračuna izolacione moći betonske pregrade na osnovu eksperimentalno određenih ugaonih raspodela na Lokaciji 1 za dve visine postavljanja mikrofonskog niza. Razlike koje se javljaju u vrednostima proračunate izolacione moći iznose do 8 dB, osim na frekvenciji 1000 Hz. Za ovaj 1/3 oktavni opseg javlja se razlika od čak 17 dB. U ovom opsegu dominantan izvor zvuka predstavljaju trolejbusi koji prolaze Ulicom cara Nikolaja II. Velika razlika za jednu i drugu visinu potiče od različitog oblika dobijene raspodele, ali rezultat lokalizacije zavisi i od broja ovih vozila koje su prošla u toku merenja od pola časa. Trolejbus emituje dominantan uskopojasan zvučni sadržaj u ovom opsegu pa će broj prolazaka uticati na vrednost zvučne energije. U situaciji kada je mikrofonski niz bio na visini 1 očigledno je da je broj prolazaka vozila bio veći, pa je izolaciona moć na frekvenciji 1000 Hz manja. Sa slike se primećuje da je vrednost izolacione moći u skoro svim opsezima, osim pomenutog na 1000 Hz, veća za slučaj betonske pregrade sa raspodelom dobijenom za visinu 2. Takođe, jednobrojna vrednost za visinu 2 veća je za 1 dB u odnosu na situaciju gde je mikrofonski niz bio na visini 1.

Na Slici 7.6 b) prikazane su proračunate vrednosti izolacione moći staklene pregrade dobijene na osnovu raspodela za dve visine mikrofonskog niza na Ulici cara Nikolaja II. Sa slike se može videti dobro poklapanje ove dve krive koje predstavljaju izolacionu moć. Izvesne razlike postoje u oblasti visokih frekvencija, međutim razlika je promenljivog znaka u različitim opsezima pa je jednobrojna vrednost u ovom slučaju ista za obe pozicije mikrofonskog niza.



Slika 7.6 Frekvencijska zavisnost vrednosti izolacione moći a) betonske pregrade debljine 16 cm za Lokaciju 1 i dve visine, b) staklene pregrade debljine 5 mm za Lokaciju 1 i dve visine, c) betonske pregrade debljine 16 cm za Lokaciju 3 i dve visine, d) staklene pregrade debljine 5 mm za Lokaciju 1 i dve visine

Na Slici 7.6 c) prikazan je rezultat proračuna izolacione moći za dve visine mikrofonskog niza za betonsku pregradu debljine 16 cm. Ova ulica pripada kategoriji kanjon ulica pa je raspodela zvučne energije drugačija u odnosu na prethodnu situaciju, pre svega zbog postojanja reflektovane energije i bočne energije na ulazu i izlazu iz kanjon ulice. Zbog toga je očekivano da postoje razlike i u izolacionoj moći u zavisnosti od visine na kojoj je ugrađena pregrada. Sa slike se vidi da je veća izolaciona moć ostvarena za manju visinu u svim frekvencijskim opsezima. Zbog toga se javlja i razlika od 1 dB u jednobrojnoj vrednosti izolacione moći između dve visine na ovoj lokaciji.

U situaciji kada je staklena pregrada analizirana u Molerovoj ulici razlike u izolacionoj moći su veće u odnosu na slučaj sa betonskom pregradom, što se vidi na Slici 7.6 d). Razlike se javljaju u svim opsezima i iznose i do 8 dB na visokim frekvencijama. Zbog postojanja reflektovane energije na visokim frekvencijama i poklapanja sa oblasti u kojoj se javlja frekvencija koinkidencije stakla razlike su veće na visokim frekvencijama. Jednbrojna vrednost izolacione moći analizirane pregrade razlikuje se za 3 dB za dve posmatrane visine u ovoj ulici. Razlika od 3 dB predstavlja veliku razliku u smislu izolacionih svojstava pregrade i zaštite unutrašnjosti zgrade od spoljašnje buke.

Na osnovu prikazanih rezultata u ovom odeljku zaključuje se da razlika u ugaonim raspodelama za različite visine dovodi do razlike u izolacionim svojstvima pregrade koja se ugrađuje na te visine. U zavisnosti od građevinskih svojstava pregrade vrednost razlike varira, ali može biti veoma velika za slučajeve pregrada kod kojih je frekvencija koinkidencije na visokim frekvencijama. Sa porastom visine povećava se vrednost izolacione moći za ulicu koja nema zgrade na naspramnoj strani ulice, dok se u situaciji kanjon ulice sa povećanjem visine na kojoj se analizira pregrada izolaciona moć smanjuje. I ako je u ovim slučajevima promena visine oko 1.5 m razlike u ostvarenim izolacionim moćima postoje. To znači da je moguće da će se za veće promene visine javiti i veće razlike u ostvarenoj izolacionoj moći po frekvencijskim opsezima, ali i jednbrojne vrednosti.

7.4 Analiza ostvarenih vrednosti izolacione moći po kategorijama

U poglavlju 5 prikazana je metodologija za kategorizaciju mernih mesta na osnovu oblika funkcija gustine verovatnoće ugaone raspodele incidentne energije, koje su dobijene na osnovu rezultata algoritama za prostorno-vremensku obradu signala sa mikrofonskog niza. Prikazana metodologija je višedimenziona jer koristi oblike funkcija raspodela za više frekvencijskih opsega i više mernih lokacija. Na osnovu metodologije za kategorizaciju dobijeno je 5 kategorija, odnosno klastera, u kojima je grupisano 12 mernih lokacija. Da bi se sagledala veza ostvarenih vrednosti izolacione moći na pojedinim lokacijama sa fizičkim profilom terena izračunate su razlike između ostvarenih jednbrojnih vrednosti izolacione moći pregrade na mernoj lokaciji i jednbrojne vrednosti dobijene sa teorijskom raspodelom $\sin(2\theta)$. Parametar ΔR

predstavlja pomenutu razliku. Jednobrajne vrednosti dobijene sa teorijskom raspodelom za betonsku i staklenu pregradu i one iznose 53 dB i 26 dB, respektivno. U Tabeli 7.1 date su izracunate razlike po kategorijama koje su dobijene na osnovu algoritma za klasifikaciju.

Tabela 7.1 Razlika ostvarenih jednobrajnih vrednosti i teorijske vrednosti po kategorijama

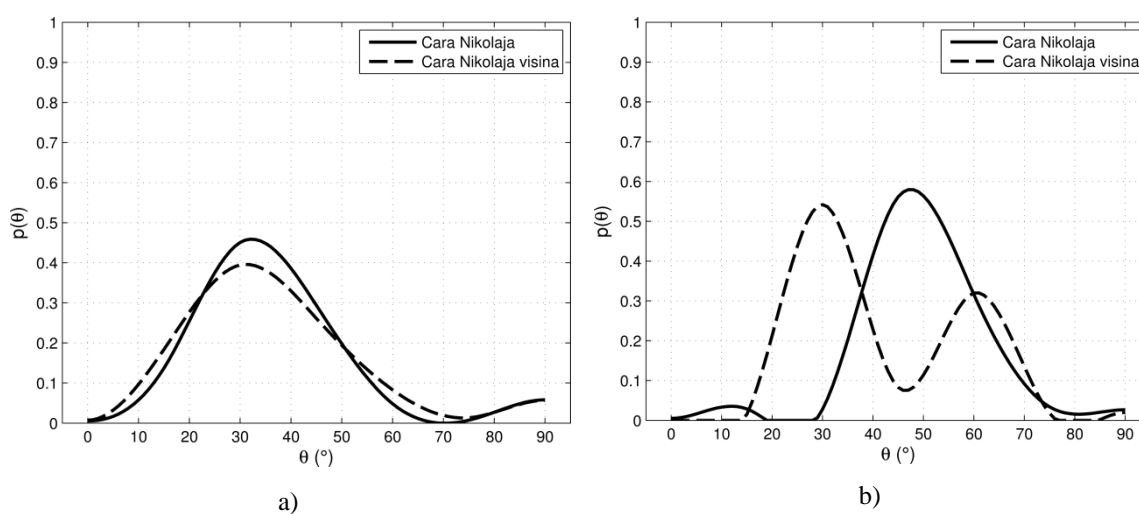
Kategorija	Opis Kategorije	Lokacija	ΔR (dB)	ΔR (dB)
			Beton 16 cm	Staklo 5 mm
I	Otvorene ulice	Cara Nikolaja II	5	6
		Cara Nikolaja II visina	6	6
II	Kanjon ulice	Bulevar kralja Aleksandra bočno	4	6
		Zgrada Molerova	6	4
		Zgrada Molerova visina	5	1
III	Široke ulice	Bulevar kralja Aleksandra	6	8
		Kraljice Marije	8	8
		Kraljice Marije visina	7	9
IV	Široke ulice sa parkom	Ruzveltova	7	8
		Karnegijeva	10	9
V	Ulice u dolini	Ilije Garašanina	7	8
		Ilije Garašanina visina	6	6

Na osnovu podataka iz tabele može se zaključiti da su sve vrednosti pozitivne. To znači da bi se ugradnjom pregrade na lokacije na kojima su izvršena merenja ostvarile veće vrednosti izolacionih moći od onih koje su izracunate na osnovu teorijske raspodele. Vrednosti razlike variraju u opsegu od 4 dB do 10 dB za betonsku pregradu debljine 16 cm i od 1 dB do 9 dB za pregradu od stakla debljine 5 mm.

Na osnovu Tabele 7.1 uočava se da postoje razlike u vrednostima za merne situacije koje pripadaju istoj kategoriji. Razlike između vrednosti parametara ΔR za neke merne situacije koje pripadaju istoj kategoriji ne postoje, dok se u nekim kategorijama javljaju razlike i do 3 dB. Da bi se objasnile ove razlike potrebno je pronaći i analizirati razloge zbog kojih su razlike nastale. Prilikom proračuna izolacione moći pregrade za različite lokacije koriste se isti građevinski parametri, pa je razlika vrednosti parametra ΔR nastala usled razlike u oblicima raspodela. Najveće razlike između jednobrojnih vrednosti izolacione moći nastaju usled razlika u oblicima raspodela za frekventijske opsege koji se poklapaju sa položajem frekvencije koincidencije materijala od kog je pregrada izrađena. Izolaciona moć materijala ima najmanju vrednost na frekvenciji koincidencije [7], pa je zbog toga ovaj frekventijski opseg važan. Razlike u oblicima raspodela za ostale frekventijske opsege takođe utiču na razliku u ostvarenim izolacionim moćima, ali je njihov uticaj značajno manji od uticaja oblika raspodele za frekventijski opseg koji odgovara frekvenciji koincidencije materijala. Za korišćenu betonsku pregradu frekvencija koincidencije iznosi 120 Hz, dok je za staklenu pregradu frekvencija koincidencije 2700 Hz. Na osnovu aproksimacija datih na početku ovog poglavlja za frekvencije manje od 250 Hz usvojen je isti oblik raspodele kao i u opsegu 250 Hz. Za frekvencije veće od 2000 Hz usvojen je oblik raspodele isti kao i na 2000 Hz. Na osnovu toga oblici raspodela na 250 Hz i na 2000 Hz odgovaraju frekventijskim opsezima u kojima je frekvencija koincidencije betonske i staklene pregrade, respektivno. Poređenjem oblika raspodela u ova dva opsega moguće je utvrditi razlike koje se javljaju u vrednostima parametra ΔR za merne situacije iz iste kategorije.

Funkcije gustine verovatnoće ugaone raspodele, prikazane u poglavlju 5, izračunate su na osnovu rezultata algoritama za lokalizaciju sa ugaonom rezolucijom od 1° . Da bi se sagledale globalne razlike u oblicima raspodela za različite merne situacije dovoljno je posmatrati raspodele sa manjom rezolucijom. Zbog toga je u ovom odeljku izvršeno smanjivanje rezolucije po uglu postojećih raspodela na 15° . Dodatno, dobijene vrednosti takve funkcije gustine raspodele uobličene su sa polinomskim krivama [84], da bi se izbegli pravolinijski segmenti u prikazu između pojedinačnih tačaka na grafiku. Zbog zavisnosti vrednosti izolacione moći od incidentnog ugla [82] povećana vrednost verovatnoće za različite uglove ima različite uticaje na ostvarenu vrednost izolacione

moći. Za incidentne uglove bliske 0° pregrada ispoljava efektivno veću izolacionu moć, dok za uglove bliske 90° pregrada ima male vrednosti izolacione moći. Na osnovu toga, posmatrajući oblike raspodela za različite merne situacije koje pripadaju istoj klasi mogu se utvrditi razlozi za postojanje eventualnih razlika u ostvarenim jednobrojnim vrednostima izolacione moći. Na Slikama od 7.7 do 7.11 prikazani su oblici tako dobijenih raspodela za sve kategorije ulica i dva frekventijska opsega koja dominantno utiču na analizirane pregrade.

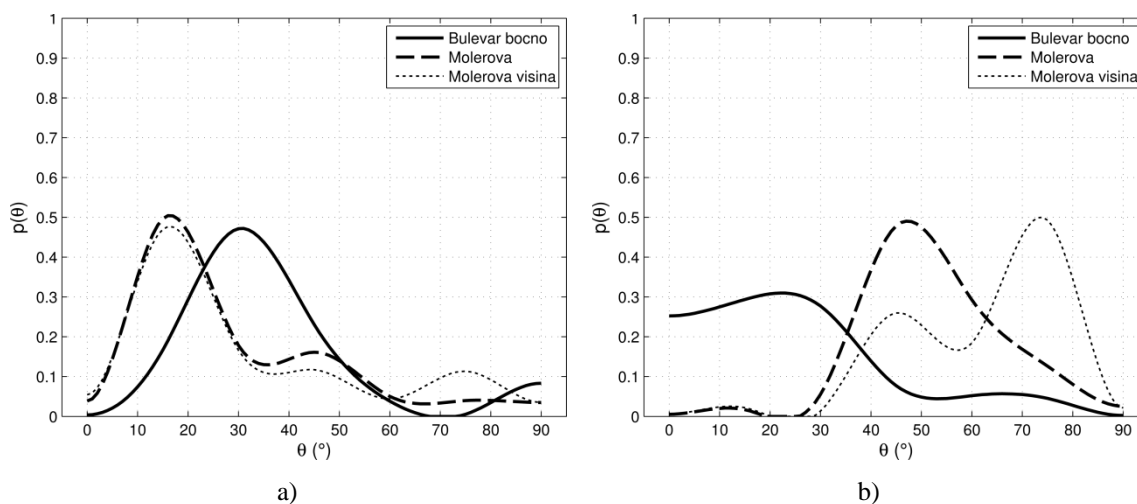


Slika 7.7 Oblici ugaone raspodele spoljašnje buke za Kategoriju I za opseg a) 250 Hz i b) 2000 Hz

Na Slici 7.7 prikazane su funkcije gustine verovatnoće ugaone raspodele spoljašnje buke za merne lokacije u Ulici cara Nikolaja II, za dve visine merenja i dva frekventijska opsega. Ove ulice pripadaju istoj kategoriji – otvorenih ulica, odnosno ulica koje nemaju zgrade na suprotnoj strani ulice, a ulica se nalazi blizu fasade na kojoj se vrši merenje. Za betonsku pregradu javlja se razlika od 1 dB u ostvarenoj vrednosti izolacione moći za ove dve merne situacije, dok za za staklenu pregradu ne postoji razlika u ostvarenim izolacionim moćima. Razlika za betonsku pregradu potiče od toga što merna situacija Cara Nikolaja visina ima nešto veću vrednost verovatnoće za manje vrednosti uglova, odnosno uglova manjih od 20° . Za ostale vrednosti uglova oblici raspodela se poklapaju. Za staklenu pregradu ne postoji razlika u ostvarenim vrednostima jednobrojne vrednosti izolacione moći i ako oblici raspodela sa Slike 7.7 b) ukazuju da bi ona trebala da postoji. Međutim, detaljnijom analizom prikazanih oblika

raspodele dobijeni rezultat može biti objašnjen. Maksimum raspodele za situaciju u Cara Nikolaja visina ima maksimum za manju vrednost ugla u odnosu na situaciju Cara Nikolaja, što bi značilo da treba da ima veću vrednost ostvarene izolacione moći. Međutim, za ovu mernu situaciju minimum funkcije gustine verovatnoće nalazi se na većoj vrednosti ugla u odnosu na mernu situaciju sa manjom visinom, pa bi trebalo da je u toj situaciji veća vrednost izolacione moći bude za manju visinu. Kombinacijom ova dva uticaja dolazi se do toga da ove dve merne situacije za staklenu pregradu imaju istu vrednost izolacione moći. Takođe, i ostali frekventijski opsezi imaju mali uticaj na ostvarenu vrednost izolacione moći.

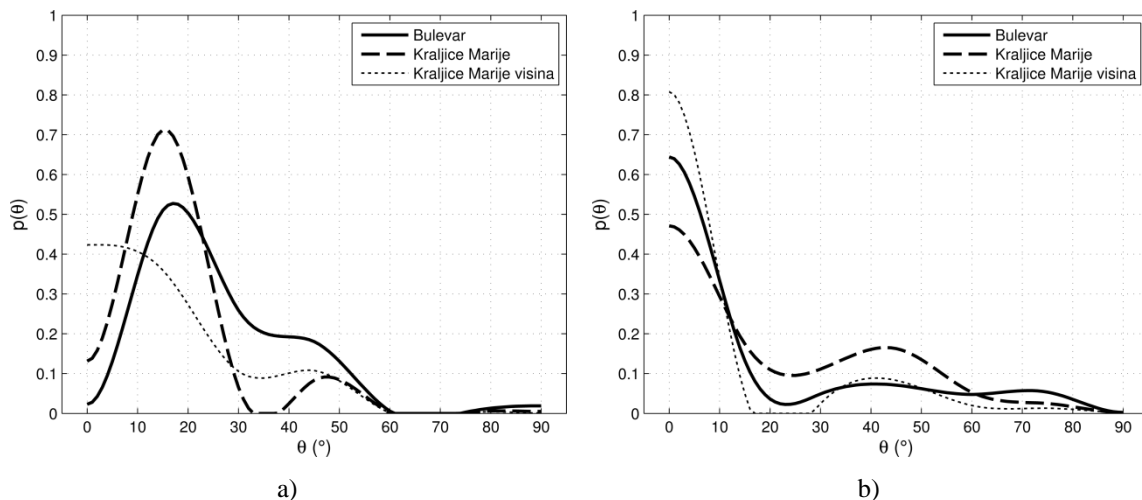
Kategorija II, odnosno kategorija kanjon ulica, sadrži tri merne situacije u kojima se ostvarena jednobrojna vrednost razlikuje 2 dB za betonsku pregradu i čak 5 dB za staklenu pregradu. Na Slici 7.8 prikazani su oblici raspodela za frekventijske opsege 250 Hz i 2000 Hz.



Slika 7.8 Oblici ugaone raspodele spoljašnje buke za Kategoriju II za opseg a) 250 Hz i b) 2000 Hz

Merna situacija Bulevar bočno ima pomeren maksimum u odnosu na dve druge merne situacije iz ove klase i povećanu vrednost verovatnoće za uglove bliske 90° . Zbog toga je ostvarena jednobrojna vrednost izolacione moći za ovu situaciju manja u odnosu na druge dve situacije. Za mernu situaciju Molerova visina funkcija gustine verovatnoće ima veće vrednosti u oblasti incidentnih uglova između 60° i 90° , u odnosu na mernu

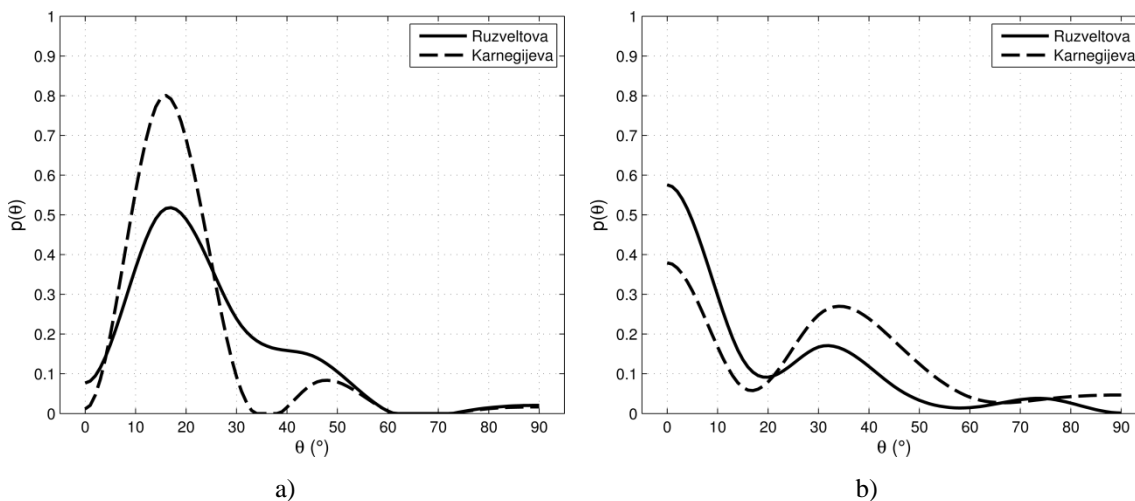
situaciju Molerova. Zbog toga se za merno mesto u Molerovoj ulici sa većom visinom postavljanja mikrofonskog niza dobila manja vrednost izolacione moći. Razlike u izolacionoj moći između ove tri merne situacije iz kategorije II drastičnije su za slučaj staklene pregrade. Sa Slike 7.8 b) uočava se da se za merno mesto Molerova visina maksimum funkcije gustine verovatnoće ugaone raspodele nalazi na vrednosti ugla koja je bliska 90° . Zbog toga je vrednost izolacione moći u ovom slučaju najmanja u odnosu na druga merna mesta iz ove kategorije. Poredeći oblike raspodela za ostala dva merna mesta zaključuje se da će zbog položaja maksimuma funkcije gustine verovatnoće merno mesto u Molerovoj ulici imati manje vrednosti izolacione moći u odnosu na situaciju Bulevaru bočno.



Slika 7.9 Oblici ugaone raspodele spoljašnje buke za Kategoriju III za opseg a) 250 Hz i b) 2000 Hz

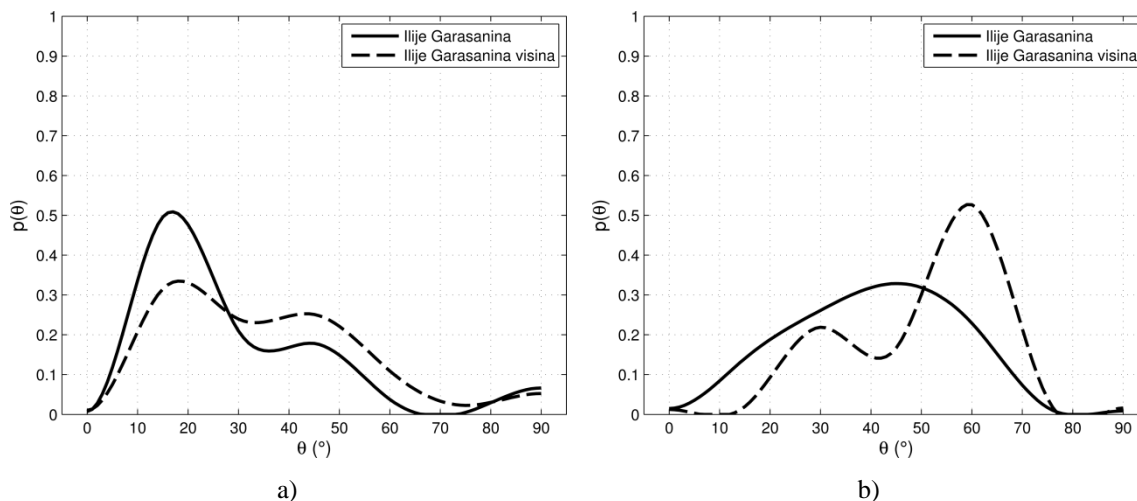
Na Slici 7.9 prikazani su oblici raspodela za Kategoriju III, odnosno kategoriju širokih ulica sa udaljenom fasadom od ulice, za frekvencijske opsege 250 Hz i 2000 Hz. Sa Slike 7.9 a) se može uočiti da je verovatnoća ugaone energije za merno mesto Bulevar koncentrisana na većim vrednosti uglova u odnosu na druge dve situacije. Zbog toga je izolaciona moć ostvarena betonske pregrade na ovoj lokaciji najmanja u prikazanoj kategoriji. Vrednosti izolacione moći za druge dve lokacije se razlikuju za 1 dB. Vrednosti verovatnoće za manje uglove veće su za mernu situaciju u Ulici kraljice Marije, pa se za ovo merno mesto javlja najveća vrednost izolacione moći u ovoj kategoriji ulica. U slučaju pregrade od stakla, čija izolaciona moć dominantno zavisi od

oblika raspodele na 2000 Hz, razlike su manje između mernih situacija iz ove kategorije i iznose 1 dB. Oblici raspodela su približno isti, osim u oblastima uglova bliskim 0°. Zbog povećane vrednosti verovatnoće u ovoj oblasti za merno mesto Kraljice Marije visina dobija se veća jednobrojna vrednosti izolacione moći.



Slika 7.10 Oblici ugaone raspodele spoljašnje buke za Kategoriju IV za opseg a) 250 Hz i b) 2000 Hz

Kategoriju IV čine merna mesta kod kojih je fasada udaljena od ulice sa velikom širinom, a sa naspramne strane od mesta merenja nalazi se otvoren prostor. Na Slici 7.10 prikazani su oblici funkcija raspodele za dva frekvencijska opsega i merna mesta koja pripadaju kategoriji IV. Za betonsku pregradu javljaju se razlike od 3 dB između dve merne. Razlog za ovu razliku je to što je oblik funkcije gustine raspodele za mernu lokaciju u Karnegijevoj ulici takav da verovatnoća ima najveće vrednosti za male vrednosti ugla. U mernom scenariju u Ruzveltovoj ulici koncentracija verovatnoće ugaone energije se nalazi u širem opsegu uglova u odnosu na Karnegijevu ulicu, pa je zbog toga vrednost izolacione moći u tom slučaju manja. Za opseg visokih frekvencija, koje dominantno određuju izolacionu moć staklene pregrade, oblik raspodela za merne situacije u ovoj kategoriji je približno isti. Zbog veće koncentracije verovatnoće u opsegu uglova između 20° i 60° za mernu situaciju u Karnegijevoj ulici dobija se nešto veća vrednost u odnosu na slučaj u Ruzveltovoj ulici.



Slika 7.11 Oblici ugaone raspodele spoljašnje buke za Kategoriju V za opseg a) 250 Hz i b) 2000 Hz

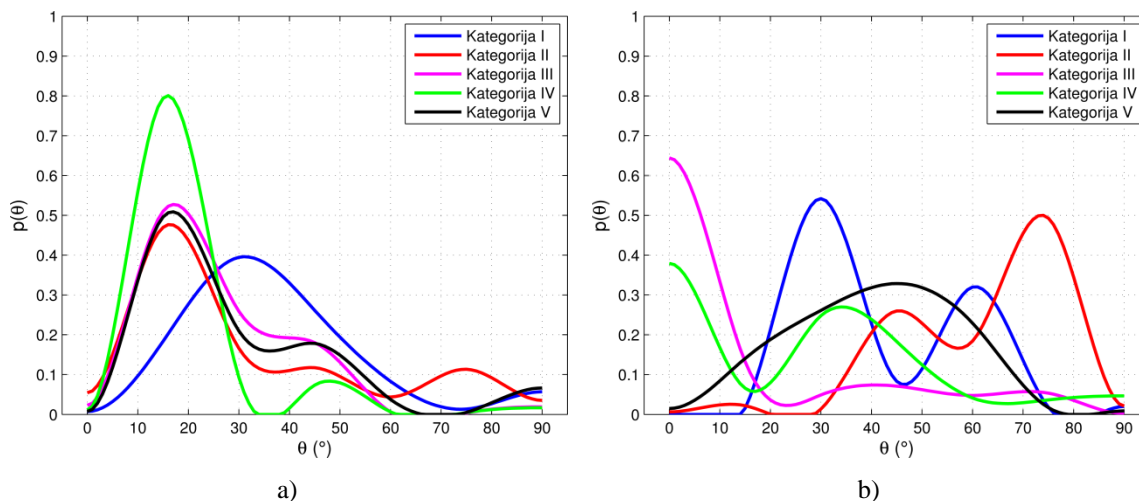
Na Slici 7.11 prikazani su oblici raspodela za dva frekvencijska opsega i merna mesta koja pripadaju Kategoriji V. U ovoj kategoriji javljaju se razlike u ostvarenoj vrednosti izolacione moći za različite merne lokacije od 1 dB za betonsku pregradu i 2 dB za pregradu od stakla. Za obe pregrade veća vrednost izolacione moći dobija se za mernu lokaciju Ilije Garašanina. Posmatrajući oblike raspodela za frekvencijski opseg 250 Hz zaključuje se da je vrednost verovatnoće za male vrednosti uglova veća u slučaju merenja na manjoj visini, pa je zbog toga ostvarena izolaciona moć veća. Za slučaj staklene pregrade, odnosno oblasti visokih frekvencija, razlika u oblicima raspodela za merne situacije je veća u odnosu na situaciju sa Slike 7.11 a). Zbog veće vrednosti verovatnoće za uglove bliske 90° u mernoj situaciji Ilije Garašanina visina ostvarena je manja vrednost izolacione moći u odnosu na mernu situaciju sa manjom visinom.

Razlike u ostvarenoj jednobrojnoj vrednosti izolacione moći za merne situacije koje pripadaju istoj klasi postoje zbog oblika raspodela ugaone energije, koje su prikazane u prethodnom izlaganju. Razlog zašto su se ove merne situacije našle u istoj kategoriji je to što se klasifikacija vrši na osnovu višedimenzionih raspodela, a ne samo analizirana dva oblika raspodela za 250 Hz i 2000 Hz. Bez obzira na odstupanje u pojedinim kategorijama za vrednosti parametra ΔR mogu se izvesti određeni zaključci. U tu svrhu za svaku klasu izračunata je srednja vrednost ostvarene jednobrojne vrednosti izolacione moći. U Tabeli 7.2 date su usrednjene vrednosti po kategorijama.

Tabela 7.2 Razlika ostvarenih jednobrojnih vrednosti i teorijske vrednosti po kategorijama

Kategorija	Opis Kategorije	ΔR (dB) Beton 16 cm	ΔR (dB) Staklo 5 mm
I	Otvorene ulice	5.5	6
II	Kanjon ulice	5	3.5
II	Široke ulice	7	8
IV	Široke ulice sa parkom	8.5	8.5
V	Ulice u dolini	6.5	7

Najveće razlike u odnosu na teorijski dobijenu vrednost izolacione moći, za obe vrste pregrade, javljaju se za merne lokacije sa širokim ulicama i velikim rastojanjem fasade od ulice, odnosno merne lokacije iz Kategorije III i IV. Nešto veća izolaciona moć dobijena je za slučaj širokih ulica koje imaju otvoren prostor na suprotnoj strani od mernog mesta. Na Slici 7.12 prikazani su oblici raspodela za sve kategorije, pri čemu je za svaku kategoriju izabrana jedna od mernih lokacija iz te kategorije. Kod širokih ulica (Kategorije III i IV) sa Slike 7.12 a) uočava se da se maksimum verovatnoće dobija za uglove bliske 0° , dok je za uglove veće od 60° vrednost verovatnoće za ove dve kategorije zanemarljiva. Zbog toga je ostvarena vrednost izolacione moći za ove kategorije ulica najveća. Sličan zaključak može se izvesti i na osnovu Slike 7.12 b), odnosno situacije sa pregradom od stakla. Nešto manje vrednosti parametra ΔR za Kategoriju III dobijaju se zbog manjih maksimalnih vrednosti verovatnoće u odnosu na Kategoriju IV. Najmanja ostvarena jednobrojna vrednost dobijena je za merne situacije u Kategoriji II za obe vrste analiziranih pregrada. Sa Slike 7.12 a) uočava se da se za ovu kategoriju pojavljuje povećana vrednost verovatnoće za uglove bliske 90° , što za posledicu ima manju ostvarenu vrednost izolacione moći. Na Slici 7.12 b) uočava se slična pojava, pa će ostvarena vrednost izolacione moći za pregradu od stakla u ovoj kategoriji biti manja od staklenih pregrada u svim drugim kategorijama.



Slika 7.12 Oblici ugaone raspodele spoljašnje buke za sve kategorije i opseg a) 250 Hz i b) 2000 Hz

U Kategoriji I i Kategoriji V ostvarene su vrednosti izolacione moći veće nego u Kategoriji II, ali manje u odnosu na kategorije u kojima se nalaze široke ulice. Na osnovu oblika raspodela sa Slike 7.12 vidi se da su lokacije maksimuma u funkciji gustine verovatnoće pomerene ka većim uglovima u odnosu na Kategorije III i IV. To za posledicu ima manju jednobrojnu vrednost izolacione moći. U Kategoriji I ostvarena je nešto niža vrednost izolacione moći, u odnosu na Kategoriju V, zbog toga što je verovatnoća koncentrisana na manjim uglovima, što se vidi i na Slici 7.12 a), kao i na Slici 7.12 b).

7.5 Diskusija rezultata

U ovom poglavlju prikazana je jedna od mogućih primena eksperimentalno dobijenih ugaonih raspodela incidentne energije spoljašnje buke pomoću mikrofonskog niza. Analiziran je uticaj oblika ugaone raspodele spoljašnje buke na fasadi na ostvarenu vrednost izolacione moći dve vrste fasadnih pregrada. Prikazani su rezultati izračunati sa raspodelama koje su dobijene pomoću različitih algoritama za obradu signala sa mikrofonskog niza i analizirane su dobijene razlike za različite merne lokacije u urbanim uslovima. Zbog različitih fizičkih konfiguracija terena pojavljuju se razlike u ostvarenoj izolacionoj moći za određene merne lokacije. U prethodnim poglavljima je pokazano da se usled različite konfiguracije terena javlja varijacija u strukturi zvučnog polja ispred fasade, a samim tim i u obliku ugaone raspodele incidentne energije. U modelu korišćenom za proračun izolacione moći pregrade se pored građevinskih

parametara pregrade, koji su konstantni za sve lokacije, se koristi i oblik ugaone raspodele, koji varira za različite lokacije u urbanim uslovima. Rezultati proračuna za sve merne situacije i dve vrste pregrada prikazane su u Prilogu 8. Takođe, izračunata su odstupanja u ostvarenim vrednostima izolacione moći po frekvencijama za sve merne lokacije prikazane u ovoj disertaciji, kao i odstupanja u jednobrojnim vrednostima. Na osnovu rezultata dobijenih u poglavlju 5, gde su prikazane funkcije gustine verovatnoće ugaone raspodele incidentne energije na fasadi, zaključeno je da se oblici raspodela razlikuju za različite visine postavljanja mikrofonskog niza na istoj mernoj lokaciji. Zbog toga su analizirani i rezultati proračuna izolacione moći za različite visine postavljanja mikrofonskog niza. U ovom poglavlju prikazane su i ostvarene jednobrojne vrednosti izolacione moći za kategorije dobijene na osnovu algoritma za kategorizaciju mernih mesta na osnovu oblika raspodele. Analizirane su razlike koje postoje između pojedinih kategorija u smislu ostvarene izolacione moći. Dodatno, objašnjene su razlike koje postoje u ostvarenim izolacionim moćima za merne situacije koje pripadaju istoj kategoriji, koristeći oblike raspodela dobijene u određenim frekvencijskim opsezima. Prikazani rezultati pokazuju da postoji varijacija u ostvarenim vrednostima izolacione moći pregrade koja je ugrađena na lokacije sa različitim profilima terena. Na osnovu izvršenih analiza pruža se uvid u gabarite odstupanja koja se mogu očekivati u vrednostima izolacione moći u urbanim uslovima.

8 Zaključak

Tema ove doktorske disertacije je analiza ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke na fasadi zgrada u urbanim uslovima. Obradivanje ove teme zahtevalo je kombinaciju nekoliko različitih naučnih oblasti: mikrofonskih nizova, prostorno-vremenske obrade signala, statistike i zvučne izolacije. Zbog različitosti naučnih oblasti ova tema je multidisciplinarna i kao takva zahteva veliki prostor za predstavljanje metodologije i rezultata, kao i njihovo tumačenje. Za analizu buke u ovoj disertaciji dizajniran je i realizovan mikrofonski niz sa optimizovanim pozicijama mikrofona u prostoru za frekvencijski opseg od interesa za komunalnu buku. Dizajnirani mikrofonski niz ima smanjen broj mikrofona uz sačuvane performanse u odnosu na druge mikrofonske nizove iz literature. U disertaciji je uvedena metoda za eksperimentalno određivanje funkcije gustine verovatnoće ugaone raspodele incidentne buke na fasadi zgrada, to jest oblika te raspodele. Metoda se zasniva na primeni mikrofonskog niza i algoritama za prostorno-vremensku obradu signala. Takva metodologija do sada nije postojala u literaturi, već su kao aproksimacija korišćene teorijske ugaone raspodele koje ne odgovaraju realnim okolnostima u urbanim uslovima.

Rezultati predstavljeni u ovom radu, dobijeni prostorno-vremenskom obradom signala sa mikrofonskog niza postavljenog na fasadu zgrada, pokazuju da je fasadna pregrada izložena složenom zvučnom polju. Njegova struktura varira u zavisnosti od konfiguracije terena u kom se fasadna pregrada nalazi. Na osnovu merenja na više lokacija u urbanim uslovima izvedeno je s tim u vezi nekoliko zaključaka. Na mernim lokacijama gde je fasadna pregrada relativno blizu kolovoza javlja se povećanje zvučne energije ne samo za prostorne uglove koji odgovaraju saobraćajnim trakama, već i za prostorne uglove bliske 90° . Zvučna energija koja dolazi pod uglom 90° "klizi" uz pregradu i ima izuzetnu važnost, jer je za ove prostorne uglove izolaciona moć pregrade najmanja. Za merne situacije u kojima je pregrada daleko od kolovoza, tipično 15 m i više, koncentracija zvučne energije javlja se za uglove bliske 0° , odnosno za normalu na fasadnu pregradu, dok se za uglove bliske 90° javlja smanjenje zvučne energije. U ovakvim situacijama pregrada ima najveće vrednosti izolacione moći.

U urbanim uslovima postoji veliki broj zvučnih izvora koji se mogu nalaziti na velikoj udaljenosti od analiziranog mernog mesta. Zbog velikog pređenog puta zvučna energija

koja je posledica rada ovih izvora sadrži samo niske frekvencije. Na osnovu rezultata dobijenih primenom algoritama za prostorno-vremensku obradu signala zaključeno je da ova energija ima male vrednosti, ali uvek postoji, pa za neke lokacije u urbanoj sredini ona može biti porediva sa saobraćajnom bukom koja dolazi iz neposredne blizine. Rezultati lokalizacije zvučnih izvora pokazuju povećanje prisustva reflektovane energije. Ona je značajna na lokacijama gde se naspram fasade nalaze druge zgrade i gde na tlu postoji tvrda podloga. U tom smislu posebno je značajna kategorija kanjon ulica. Rezultati su takođe pokazali povećanje udela reflektovane energije sa povišenjem frekvencije.

Na osnovu rezultata dobijenih u ovoj disertaciji potvrđene su polazne hipoteze da se može utvrditi stvarna raspodela zvučnog polja ispred fasade, odnosno oblik ugaone raspodele incidentne energije. Pokazano je da oblici ugaonih raspodela incidentne energije odstupaju od teorijski pretpostavljenih raspodela koje se koriste u literaturi. U literaturi se obično koriste raspodele koje odgovaraju difuznom polju, a to je raspodela $\sin(2\theta)$. Za merenje izolacione moći fasadne pregrade korišćenjem globalnog metoda pomoću zvučnika zahteva se zvučna pobuda pod uglom od $45\pm 5^\circ$ u odnosu na fasadu. Funkcije gustine verovatnoće ugaone raspodele spoljašnje energije određene za sve merne lokacije obrađene u ovoj disertaciji pokazuju da zvučna energija u realnosti ne dolazi samo iz prostornog ugla $45\pm 5^\circ$, niti ima oblik koji odgovara difuznom polju. Rezultati su pokazali da oblik raspodele, to jest njena funkcije gustine verovatnoće, zavisi od konfiguracije terena na kome se pregrada nalazi.

Polazeći od izračunatih oblika raspodela za različite merne situacije izvršena je statistička analiza pomoću koje je izvršena kategorizacija mernih mesta. Kategorizacija je izvršena na osnovu vrednosti funkcije gustine verovatnoće ugaone raspodele za pojedinačne prostorne uglove i za 1/3 oktavne opsege. Merna mesta sa sličnom konfiguracijom terena našla su se u istim klasterima (kategorijama) nakon kategorizacije, čime je pokazano da postoji zavisnost oblika ugaone raspodele spoljašnje incidentne energije od profila terena na kom se fasada nalazi. U sprovedenoj analizi broj kategorija nije fiksiran, pa se dodavanjem novih merenja procedura može ponovo sprovesti i jednostavno dobiti novi rezultati kategorizacije. Na osnovu ove analize moguće je utvrditi kojoj kategoriji pripada analizirano merno mesto. To može

biti postupak za zoniranje ulica u urbanim zonama prema profilu terena, a sa aspekta zvučne energije koja pogađa fasade.

U ovom radu jedna od upotreba raspodela dobijenih eksperimentalno je proračun ostvarene vrednosti izolacione moći fasadnih pregrada. Izračunavanjem izolacione moći fasadnih pregrada sa poznatim građevinskim materijalima i koristeći eksperimentalno određene funkcije gustine verovatnoće ugaone raspodele incidentne energije ostvaren je uvid u izolaciona svojstva tih fasada koje se ispoljavaju u urbanim uslovima. Poređenjem vrednosti dobijenih sa teorijskim raspodelama i sa eksperimentalno određenim oblicima raspodela zaključeno je da se uvek ostvaruje veća vrednost izolacione moći pregrade ukoliko se koriste eksperimentalno dobijene raspodele. To znači da će fasadna pregrada ugrađena u urbanim uslovima imati veću vrednost ostvarene izolacione moći u odnosu na vrednost izmerenu u laboratoriji.

U radu je pokazano da postoje relativno velika odstupanja u ostvarenim vrednostima izolacione moći za merna mesta sa različitim profilom terena, kao i da ona u nekim frekvencijskim opsezima mogu biti i do 15 dB. Zaključeno je da se na lokacijama gde postoji povećanje zvučne energije u frekvencijskim opsezima koji se poklapaju sa frekvencijom koincidencije materijala javlja smanjena vrednost izolacione moći fasade. Zbog toga su posebno važne okolnosti kada je fasada izrađena od stakla, a pri tome postoji povećanje udela reflektovane zvučne energije (kanjon ulice). Tada ostvarene vrednosti izolacione moći fasadne pregrade mogu biti manje u odnosu na istu takvu pregradu na drugačijoj konfiguraciji terena.

Uvođenjem kategorizacije lokacija mesta prema obliku raspodele, odnosno prema profilu terena, omogućeno je sagledavanje razlika u ostvarenoj izolacionoj moći pregrade po utvrđenim kategorijama. U radu je pokazano da su razlike merodavne vrednosti izolacione moći pregrade po utvrđenim kategorijama i do 8 dB. Na osnovu toga može se globalno sagledati kako će se menjati ispoljena izolaciona moć fasadne pregrade u različitim konfiguracijama terena u urbanoj sredini. Ovi zaključci mogu biti korisni u procesu projektovanja novih građevinskih objekata. Prilikom projektovanja zadate su zahtevane vrednosti izolacione moći koje je potrebno ostvariti. Naime, dosadašnja praksa projektovanja je takva da se povećanjem debljine pregrade uvodi margina sigurnosti u odnosu na postavljene zahteve, čime se povećava cena izgradnje.

Rezultati dobijeni u ovoj disertaciji pružaju uvid u realno ispoljene vrednosti izolacione moći fasadne pregrade u urbanim uslovima u zavisnosti od profila terena. Pokazano je da su te vrednosti veće od laboratorijskih, pa je na taj način već ostvarena određena margina sigurnosti. Na osnovu toga mogla bi se izabrati određena fasadna pregrada (tip i debljina) koja će ispuniti propisne zahteve, uz racionalizaciju utrošenog građevinskog materijala.

8.1 Naučni doprinosi

Vrednost izolacione moći fasadne pregrade zavisi od oblika funkcije gustine verovatnoće uglaone raspodele incidentne buke na fasadi. Zbog toga je sa aspekta akustičkog komfora važno poznavanje ove raspodele kao i razlika u oblicima raspodela koje se mogu javiti kao posledica različitog profila terena u urbanim sredinama. U skladu s tim, ostvareni su sledeći naučni doprinosi doktorske disertacije:

- Dizajniran je i realizovan mikrofonski niz optimizovan za analizu saobraćajne buke.

Na osnovu frekvencijskih karakteristika saobraćajne buke u urbanim uslovima optimizovane su pozicije mikrofona u prostoru tako da realizovani mikrofonski niz ima karakteristike koje su bolje u odnosu na druge konfiguracije mikrofonskih nizova iz literature. Takođe, mikrofonski niz prikazan u radu ima smanjen broj mikrofona u odnosu na druge konfiguracije uz zadržan kvalitet lokalizacije zvučnih izvora u prostoru. Realizovan je prototip mikrofonskog niza sa optimizovanim pozicijama mikrofona, kao i prateći sistem za akviziciju signala iz njegovih mikrofona.

- Uvedena je procedura za eksperimentalno određivanje funkcije gustine verovatnoće ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke na fasadi.

Oblik ugaone raspodele incidentne energije na fasadama zgrada nije poznata u opštem slučaju i teorijski modeli ove raspodele često ne odgovaraju realnim okolnostima na terenu. Na osnovu predložene metode koja se zasniva na korišćenju mikrofonskog niza dobijena je ugaona raspodela spoljašnje buke na fasadi u frekvencijskom opsegu od interesa za akustički komfor u zgradama. Realizovan je softver za prostorno-vremensku obradu signala sa mikrofonskog niza pomoću koga se dobija struktura zvučnog polja u

prostoru ispred fasade. Realizovani softver takođe omogućava da se na osnovu rezultata algoritama za lokalizaciju zvučnih izvora u prostoru izračuna funkcija gustine verovatnoće ugaone raspodele spoljašnje buke na fasadi. Ugaona raspodela može se odrediti za bilo koju konfiguraciju terena u kojoj se može naći fasadna pregrada.

- Određivanje razlika između vrednosti izolacione moći fasadnih pregrada usled izloženosti saobraćajnoj buci u različitim konfiguracijama terena.

Razlike u oblicima ugaonih raspodela spoljašnje buke na fasadi dovode do razlika u vrednostima izolacione moći fasadnih pregrada. Rezultati izloženi u ovoj disertaciji pokazali su gabarite mogućih odstupanja te vrednosti kada se fasada nalazi u različitim uslovima. Realizovan je softver za izračunavanje frekvencijske zavisnosti vrednosti izolacione moći na osnovu građevinskih podataka za pregradu i eksperimentalno dobijenih ugaonih raspodela. Prikazani su rezultati za dve vrste fasadnih pregrada koje se najčešće pojavljuju na realnim zgradama.

- Mogućnost za uvođenje preporuka sa aspekta akustičkog komfora u zgradama pri projektovanju građevinskih objekata u urbanim zonama.

Zbog različitog profila terena u kom se mogu naći fasade zgrada u urbanim uslovima javljaju se razlike u oblicima ugaone raspodele spoljašnje buke na fasadi, odnosno u vrednostima ostvarene izolacione moći. U ovoj disertaciji prikazan je metod za kategorizaciju uslova u kojima se nalazi zgrada na osnovu oblika ugaone raspodele energije na fasadi. Na osnovu toga definisano je nekoliko kategorija u koje su svrstane sve merne lokacije obrađene u disertaciji. Pokazano je da oblici raspodela zavise od konfiguracije terena, pa dobijene kategorije predstavljaju različite urbane uslove koji su mogući u naseljima. Izračunavanjem vrednosti ostvarene izolacione moći za definisane kategorije otvara se mogućnost projektantima zgrada da ostvare uvid u realne potrebe za materijalizacijom fasada u zavisnosti od profila terena.

8.2 Buduća istraživanja

Rezultati istraživanja prikazani u ovoj disertaciji otvorili su nekoliko novih tema i ukazali na dalje pravce istraživanja. Jedan mogući pravac odnosi se na oblast obrade signala sa mikrofonskog niza. U ovoj disertaciji analizirani su mikrofonski signali čije

je trajanje bilo 30 minuta. Statističkom analizom rezultata dobijenih algoritmima za lokalizaciju sa kraćim vremenskim segmentima signala moglo bi se doći do optimalne dužine trajanja snimaka na mernim lokacijama. Takava optimizacija smanjila bi vreme potrebno da se u jednoj mernoj situaciji dobiju rezultati lokalizacije za sve algoritme i sve frekvencijske opsege.

Moguće je takođe analizirati potrebnu ugaonu rezoluciju po azimutu i elevaciji sa stanovišta tačnosti lokalizacije zvučnih izvora u prostoru ispred fasade. Za oba prostorna ugla ugaona rezolucija korišćena u tezi bila je 1° , što predstavlja vrlo finu rezoluciju. Ukoliko bi bilo moguće smanjiti ugaonu rezoluciju, uz zadržavanje tačnosti lokalizacije izvora, moglo bi se postići dalje smanjenje vremena potrebnog za obradu signala sa mikrofonskog niza.

Još jedna tema za dalja istraživanje je i određivanje optimalne vrednosti ugaone rezolucije za izračunavanje ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke na osnovu rezultata algoritama za prostorno-vremensku obradu signala. Optimalnu vrednost bi bilo moguće odrediti na osnovu rezultata algoritma za klasifikaciju, tako što bi se menjala vrednost rezolucije i odredila granična vrednost koja dovodi do drugačije klasifikacije mernih situacija.

Najzad, dalja istraživanja mogu ići i u pravcu povećana broja mernih lokacija, kao i snimanja na mernim lokacijama koje imaju drugačiji profil terena u odnosu na lokacije prikazane u ovoj disertaciji. Povećavanjem broja analiziranih lokacija možda bi bilo moguće utvrditi nove kategorije koristeći prikazani algoritam za klasifikaciju. Takođe, povećavanjem broja mernih mesta stvorile bi se mogućnosti da se pokrije više kategorija ulica prisutnih u urbanim uslovima. U ovom radu prikazane su analize u kojima je mikrofonski niz na istoj mernoj lokaciji postavljen na različitim visinama od tla. Ova analiza mogla bi biti dopunjena tako što bi bila izvršena merenja na većem broju različitih visina. Ovakva analiza posebno bi bila posebno značajna za bolje razumevanje uslova u kanjon ulicama.

9 Literatura

1. *An analysis of spontaneous noise complaints.* **Guski, R.** 1977, Environmental Research, T. 2, str. 229-236.
2. **Harris, M.** *Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control.* s.l. : McGraw-Hill Book Company, 1957. str. pp. 1-1.
3. **COUNCIL, COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE.** *On the Implementation of the Environmental Noise Directive in accordance with Article 11 of Directive.* 2002. 2002/49/EC.
4. *Neighbour noise: A rational approach.* **Berg, Van den.** Bon : s.n., 2004. Proceedings of the 2nd WHO International Housing and Health Symposium. str. 151-154.
5. *A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources.* **T. F. Brooks, W. M. Humphreys.** 2006, Journal of Sound and Vibration, T. 294, str. 856-879.
6. *History of acoustic beamforming.* **Michel, U.** Berlin : s.n., 2006. Berlin Beamforming Conference.
7. *Predicting the sound insulation of single leaf walls: Extension of Cremer's model.* **Davy, J.L.** 4, 2009, The Journal of the Acoustical Society of America, T. 126, str. 1871-1877.
8. **717-1, ISO.** *Acoustics Rating of Sound insulation in Buildings and of Building Elements - Part 1: Airborne Sound Insulation.* Geneva : s.n., 2013.
9. *Façade noise abatement prediction: New spectrum adaptation terms measured in field in different road and railway traffic conditions.* **Buratti C., Belloni E., Moretti E.** 2014, Applied Acoustics, T. 76, str. 238–248. DOI: 10.1016/j.apacoust.2013.08.016.
10. **Trees, H.L. Van.** *Optimum Array Processing.* New York : John Wiley & Sons, Inc., 2002. str. 17-90.
11. **J.J. Christensen, J. Hald.** *Beamforming.* Nærum, Denmark : Brüel&Kjær Sound&Vibration Measurement A/S, 2004.

12. *A novel beamformer array design for noise source location from intermediate measurement distances.* **J. Hald, J. Christensen.** 2002, J. Acoust. Soc. Am., T. 112, str. 2448. DOI: 10.1121/1.4780077.
13. **Godara, L.C.** *Smart antennas.* New York : CRC Press LLC, 2004.
14. **M. Brandstein, D. Ward.** *Microphone Arrays, Signal Processing Techniques and Applications.* New York : Springer-Verlag, 2001.
15. **techniques, Wideband beamforming : concepts and.** *W. Liu, S. Weiss.* s.l. : John Wiley & Sons Ltd, 2010.
16. *Localisation of sound sources on moving vehicles with phased microphone arrays.* **U. Michela, B. Barsikowb, P. Böhninga, M. Hellmig.** Prague : The 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, 2004.
17. **Underbrink, J.** *Aeroacoustic Phased Array Testing in Low Speed Wind Tunnels .* [aut. knjige] Thomas J. Mueller. *Aeroacoustic Measurements.* Berlin : Springer, 2002, 3, str. 98–217.
18. *Wind turbine noise measurement using a compact microphone array with advanceddeconvolution algorithms.* **R.C. Ramachandran, G. Raman, R.P. Dougherty.** 2014, Journal ofSoundandVibration, T. 333, str. 3058–3080.
19. *Parameterization and Reproduction of Concert Hall Acoustics Measured with a Circular Microphone Array.* **E. M. Hulsebos, D. de Vries.** s.l. : Audio Engineering Society, 2002. AES Convention. T. 112.
20. *Room impulse response measurement with a spherical microphone array, application to room and building acoustics.* **S. Barre, D. Dobler, A. Mayer.** Melbourne : s.n., 2014. Inter-noise 2014.
21. *Analysis of absorption in situ with a spherical microphone array.* **J. Rathsam, B. Rafaely.** 2015, Applied Acoustics, T. 89, str. 273-280.

22. **Kjær, Brüel &** PULSE Array-based Noise Source Identification Solutions. [Nameži] Brüel & Kjær. <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2144.ashx>.
23. *Ambiguity characterization of arbitrary antenna array: type I ambiguity.* **M. Eric, A. Zejak, M. Obradovic.** Sun City, South Africa : s.n., 1998. 1988 IEEE 5th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications - Proceedings. Spread Technology to Africa.
24. **J. Benesty, J. Chen, Y. Huang.** *Microphone Array Signal Processing.* New York : Springer Science & Business Media, 2008. str. 39-68.
25. *Combined NAH and Beamforming Using the Same Microphone Array.* **Hald, J.** 2004, SOUND AND VIBRATION.
26. **T.F. Brooks, W.M. Humphreys.** *Effect of directional array size on the measurement of airframe noise components.* s.l. : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999. str. 99-1958.
27. *The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms.* **Welch, P.D.** 2, 1967, IEEE TRANSACTIONS ON AUDIO AND ELECTROACOUSTICS, Tom. AU-15, str. 70-73.
28. **Vogel, C.R.** *Computational Methods for Inverse Problems.* Philadelphia, : Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002.
29. **W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery,.** *Numerical Recipes in FORTRAN, The Art of Scientific Computing.* Cambridge : Press Syndicate of the University of Cambridge, 1992.
30. *Extensions of DAMAS and Benefits and Limitations of Deconvolution in Beamforming.* **Dougherty, R.P.** Monterey : s.n., 2005. 26th AIAA Aeroacoustics Conference.

31. *A comparison of iterative deconvolution algorithms for the mapping of acoustic sources.* **K. Ehrenfried, L. Koop.** Cambridge : s.n., 2006. 27th AIAA Aeroacoustics Conference.
32. **R.C. Gonzalez, R.E. Woods,** *Digital Image Processing 2end Ed.* s.l. : Addison-Wesley, 1992.
33. *CLEAN Based on Spatial Source Coherence.* **Sijtsma, P.** s.l. : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007. 28th AIAA Aeroacoustics Conference.
34. *On the Properties of Pseudo Noise Sequences with a Simple Proposal of Randomness Test.* **Mitra, A.** 9, 2008, World Academy of Science, Engineering and Technology, International, T. 2, str. 631-636.
35. **Dougherty, R.** *Spiral-shaped array for broadband imaging. Pat. US 5,838,284* 1998.
36. *Design and Calibration of a Small Aeroacoustic Beamformer.* **E. Arcondoulis, C. Doolan, A. Zander, L. Brooks.** Sydney : Proceedings of the 20th International Congress on Acoustics, 2010. DOI: 10.1109/CAR.2010.5456775.
37. *Phased array element shapes for suppressing grating lobes.* **J. Pompei, S. Woohb,** 5, 2002, J. Acoust. Soc. Am., T. 11, str. 2040-2048.
38. *Optimizing a Large Array Configuration to Minimize the Sidelobes .* **L. Kogan.** 7, 2000, IEEE 270 Transactions on antennas and propagation, T. 48, str. 1075-1078.
39. *A hybrid descent method with genetic algorithm for microphone array placement design.* **Z. Li, K. F. Yiub, Z. Fengc.** 2012, Applied Soft Computing, T. 13, str. 1486-1490.
40. *Synthesis of Sparse Planar Arrays Using Modified Real Genetic Algorithm.* **K. Chen, X. Yun, Z. He, C. Han.** 4, 2007, IEEE Transactions on antennas and propagation, T. 55, str. 1067-1073.

41. *Optimal irregular microphone distributions with enhanced beamforming performance in immersive environments.* **J. Yu, K. Donohue.** 2013, J. Acoust. Soc. Am., T. 134, str. 2066-2077.
42. *Improving beampatterns of two-dimensional random arrays using convex optimization.* **P. Gerstofta, W. Hodgkiss.** 4, 2002, J. Acoust. Soc. Am., T. 129, str. E135-EL140.
43. *Optimized microphone deployment for near-field acoustic holography: To be, or not to be random, that is the question.* **M. Bai, J. Lin, K. Liu.** 2010, Journal of Sound and Vibration, T. 329, str. 2809-2824.
44. **International Organization for Standardization.** *ISO 717-1:2013, Acoustics Rating of sound insulation in buildings and of building elements-Part 1: Airborne sound insulation.* 2013.
45. *Validation of a complex urban noise model close to a road.* **E. Walerian, R. Janczur, M. Czechowicz, Y. Smyrnova.** 2011, Applied Acoustics, T. 72, str. 790-820. DOI: 10.1016/j.apacoust.2011.04.009.
46. **Trees, H. Van.** *Optimum Array Processing.* New York : John Wiley & Sons, Inc., 2002. str. 17-90.
47. *A New Algorithm for Statistical Circuit Design Based on Quasi-Newton Methods and Function Splitting.* **R. Brayton, S. Director, G. Hachtel, L. Vidigal.** 26, 1979, IEEE Trans. Circuits and Systems , str. 784-794. DOI: 10.1109/TCS.1979.1084701.
48. *A comparison of popular beamforming array.* **Z. Prime, C. Doolan.** Victor Harbor : s.n., 2013. Proceedings of ACOUSTICS.
49. *Microphone array geometry optimization for traffic noise analysis .* **M. Bjelić, M. Stanojević, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić.** May 2017, The Journal of the Acoustical Society of America, str. 3101-3104.
50. *Stationary and Nonstationary Learning Characteristics of the LMS Adaptive Filter.* **B. Widrow, M.G. Larimore, C.R. Johnson, J.M. Mccool.** 8, 1976, IEEE, T. 64, str. 1151-1162.

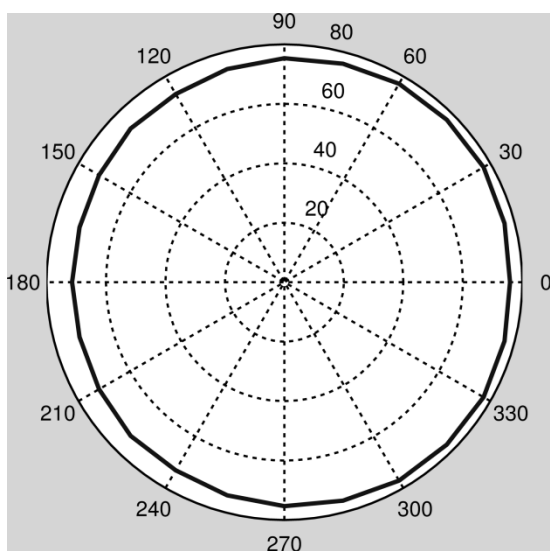
51. *Equalization Frequency Characteristics of the Microphone for Acoustic Camera*. **O. Jovanović, M. Bjelić, J. Čertić**. Kladovo, Serbia : s.n., 2017. 4th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering .
52. [Na mreži] [Citirano: 8 2 2017.] <http://www.procab.be/Producten/ProductDetail?prodId=1921>.
53. [Na mreži] [Citirano: 8 2 2017.] <https://www.reichelt.de/FL-B30/3/index.html?ACTION=3&GROUPID=7440&ARTICLE=7813&SHOW=1&OFFSET=16&>.
54. [Na mreži] MOTU. [Citirano: 8 2 2017.] <http://motu.com/products/avb/24ai-24ao>.
55. **RS, Službeni glasnik**. *Zakon o zaštiti buke u životnoj sredini*. 2009. 36/2009.
56. **Miomir Mijić, Dragana Šumarac Pavlović**. *Završni izveštaj o aktivnostima realizovanim u okviru projekta izrade metodologije za određivanje akustičkih zona na teritoriji Beograda*. Beograd : Elektrotehnički fakultet, 2011.
57. **Google**. Google Maps. [Na mreži] [Citirano: 4 8 2017.] <https://www.google.rs/maps/@44.8027522,20.4792302,16.04z>.
58. *The propagation of sound in narrow street canyons*. **K. Iu, K. Li**. 2, 2002, The Journal of the Acoustical Society of America, T. 112, str. 537-550.
59. *Sound propagation in street canyons: Comparison between diffusely and geometrically reflecting boundaries*. **Kang, J**. 3, 2000, The Journal of the Acoustical Society of America, T. 107, str. 1394-1404.
60. **FLUKE**. Fluke 971 Temperature Humidity Meter . [Na mreži] [Citirano: 5 8 2017.] <http://www.fluke.com/fluke/r0en/HVAC-IAQ-Tools/Air-Testers/Fluke-971.htm?PID=56155>.
61. **ANSI**. *Specification for Octave, Half-Octave, and Third Octave Band Filter Sets*. 2009. S1.11.
62. *ABCDepth: efficient algorithm for Tukey depth*. **M. Bogicevic, M. Merkle**. 2016, CoRR, T. abs/1603.05609. <http://arxiv.org/abs/1603.05609>. arXiv:1603.05609v2.

63. MultiKMeansPlusPlusClusterer. [Na mreži]
<http://commons.apache.org/proper/commons-math/apidocs/org/apache/commons/math4/ml/clustering>.
64. **140, ISO.** *Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements.* 2004.
65. **12354-1, ISO.** *Building acoustics -- Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 1: Airborne sound insulation between rooms.* 2017.
66. **15712-1, ISO.** *Building acoustics -- Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 1: Airborne sound insulation between rooms.* 2005.
67. *Calculation of the sound transmission between dwellings by partitions and flanking structures.* **Gerretsen, E.** 6, 1979, Applied Acoustics, T. 12, str. 413-433.
68. **Beranek, L.** *Noise Reduction.* New York : McGraw-Hill Book Company, Inc., 1960.
69. **I.L. Ver, L. Beranek.** *Noise and vibration control engineering - Principles and applications 2nd ed.* s.l. : John Wiley & Sons.m Inc., 2006. str. 444-445.
70. **12354-1, SRPS EN.** *Akustika u građevinarstvu — Ocena zvučne zaštite zgrada na osnovu akustičkih performansi građevinskih elemenata — Deo 1: Zvučna izolacija između prostorija.* 2008.
71. **12354-3, EN.** *Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound.* 2000.
72. **15712-3, ISO.** *Building acoustics — Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound.* 2005.
73. **Kuttruff, H.** *Acoustics An introduction.* New York : Taylor & Francis, 2007.

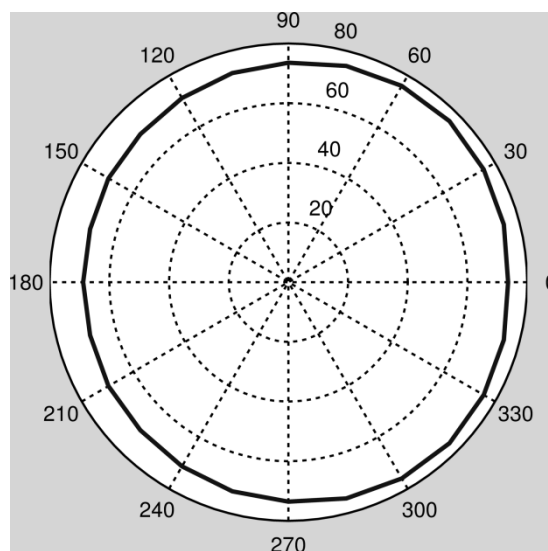
74. **Kurtović, H.** *Osnovi tehničke akustike*. Beograd : Naučna knjiga, 1982.
75. *Transmission of Reverberant Sound Through Single*. **London, A.** 1949, Journal of Research, T. 42, str. 605-615.
76. *Predicting the Sound Insulation of Walls*. **Davy, J.L.** 1, 2009, JOURNAL OF BUILDING ACOUSTICS, T. 16, str. 1-21.
77. *The improvement of a simple theoretical model for the prediction of the sound insulation of double leaf walls*. **Davy, J.L.** 2, 2009, The Journal of the Acoustical Society of America, T. 127, str. 841-849.
78. **R. Bolt, L. Beranek, R. Newman.** *HANDBOOK OF ACOUSTIC NOISE CONTROL Supplement 1*. AERO MEDICAL LABORATORY. Air Force Base, Ohio : WRIGHT AIR DEVELOPMENT CENTER, 1955.
79. **Cremer, L.** *Vorlesungen uber Technische Akustik*. New York : Springer-Verlag, 1971.
80. *Nachhallzeit und mittlere Schnelle von ebenen Platten bei BiegeWellenanregung*. **Richter, U.** 1968, Hochfrequenztechnik und Elektroakustik 5-6, str. 189-192.
81. **Kurtović, H.** *Priručnik za proračun zvučne izolacije*. Beograd : Elektrotehnički fakultet, Laboratorija za akustiku, 1994.
82. *Airborne sound insulation of monolithic partition*. **D. Šumarac Pavlović, F. Pantelić, S. Bojičić, M. Bjelić.** Krakow : European Acoustics Association, 2017. Forum ACUSTICUM.
83. **16283-1, ISO.** *Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 1: Airborne sound insulation*. 2014.
84. **Boor, C. de.** *A Practical Guide to Splines*. New York : Springer-Verlag, 1978. T. 27. 978-0-387-95366-3.
85. *Noise Attenuation of Ear-Protective Devices*. **J. C. Webster, E. R. Rubin.** 34, 1962, Sound: Its uses and Control, T. 1.

10 Prilozi

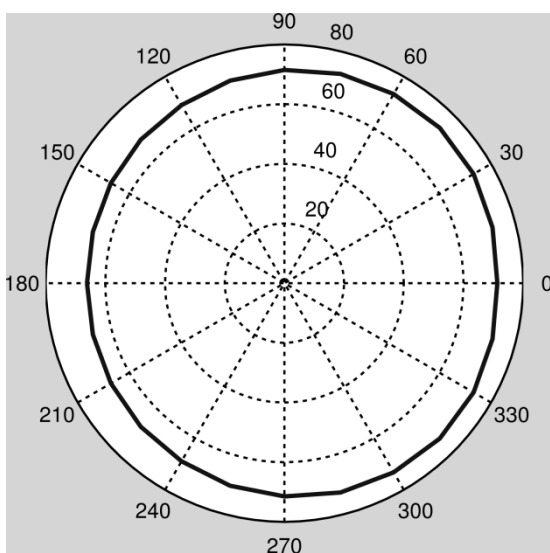
P.1 Rezultati merenja usmerenosti mikrofona



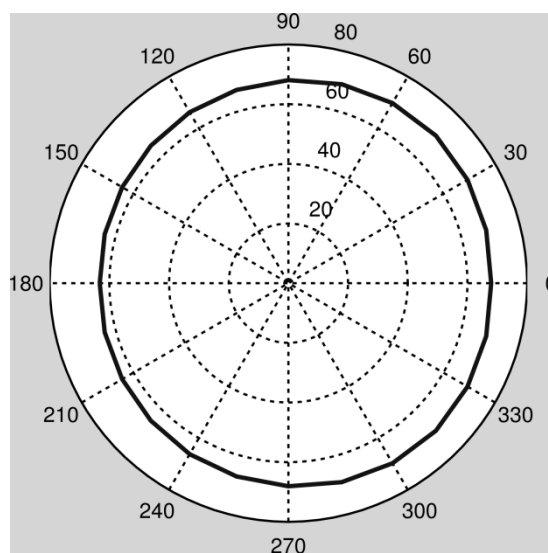
Slika 10.1 Dijagram usmerenosti 125 Hz



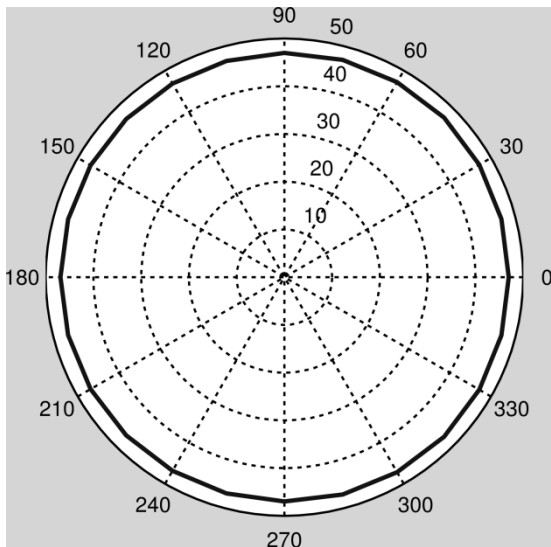
Slika 10.2 Dijagram usmerenosti 250 Hz



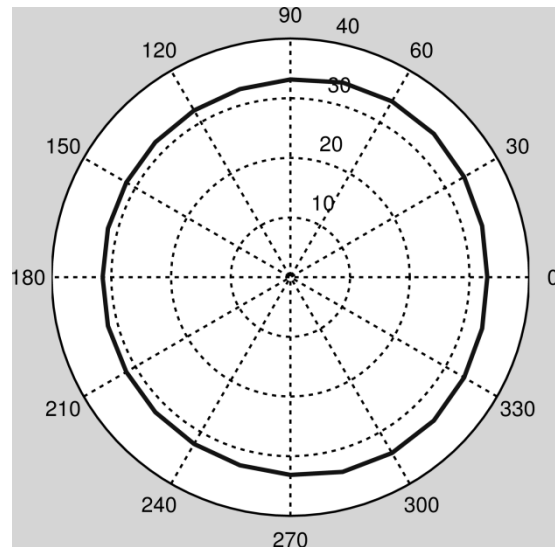
Slika 10.3 Dijagram usmerenosti 500 Hz



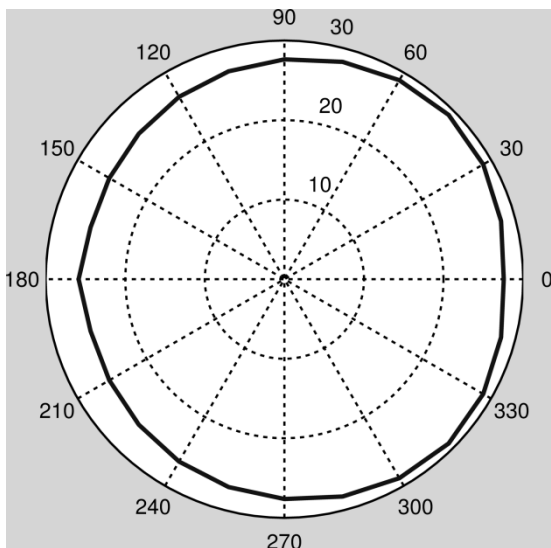
Slika 10.4 Dijagram usmerenosti 1000 Hz



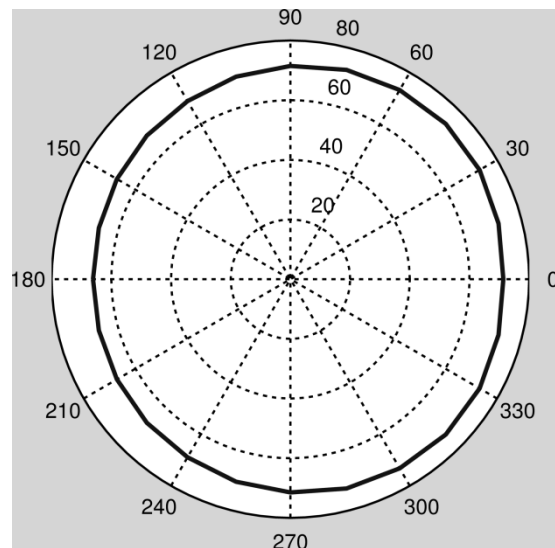
Slika 10.5 Dijagram usmerenosti 2000 Hz



Slika 10.6 Dijagram usmerenosti 4000 Hz



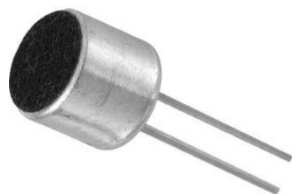
Slika 10.7 Dijagram usmerenosti 8000 Hz



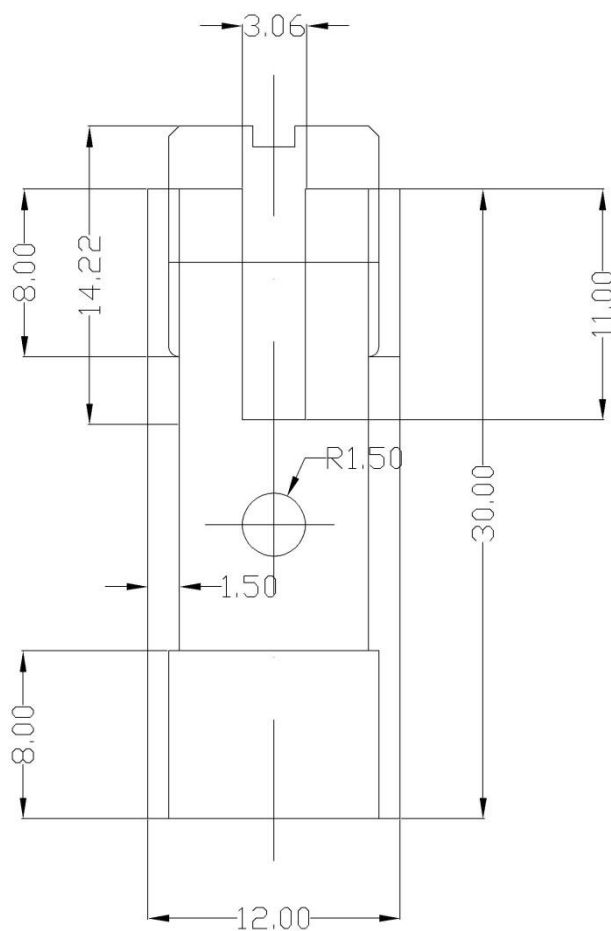
Slika 10.8 Dijagram usmerenosti Širokopojasno

P.2 Komponente mikrofonskog niza i mernog sistema

P2.1 Mikrofolni



Slika 10.9 Izgled mikrofolna korišćenog u realizaciji sistema



Slika 10.10 Tehnički crtež projektovanog kućišta za mikrofon



Slika 10.11 Izgled kućišta mikrofona sa ugrađenim mikrofonom

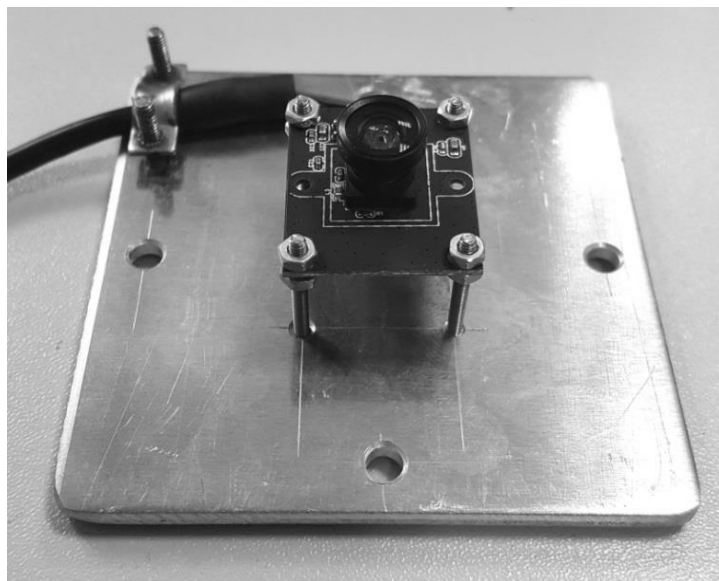


Slika 10.12 Postavljanje mikrofona na sajle konstrukcije

P2.2 Kamera

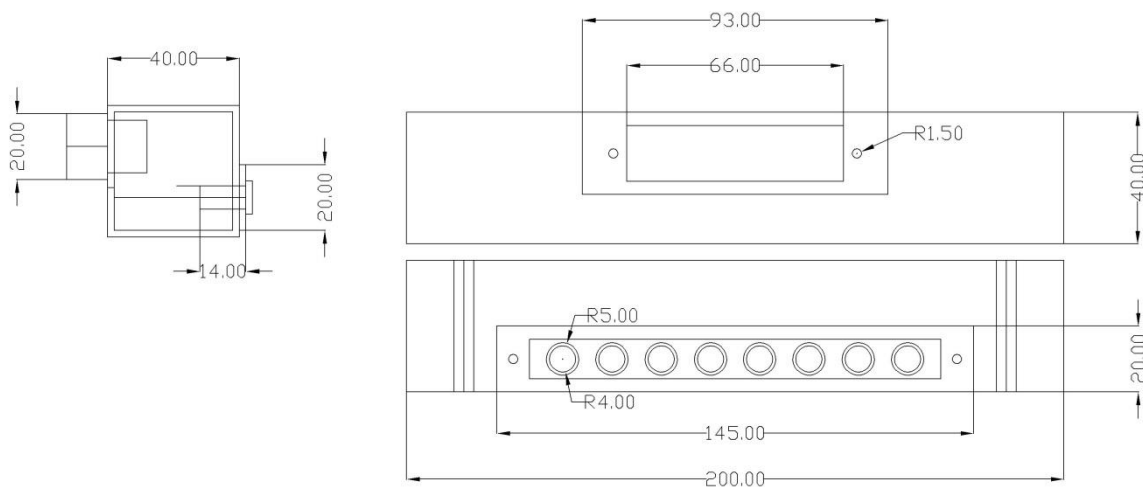
Tabela 10.1 Karakteristike korišćene video kamere

Rezolucija	1284x724 pixel
Horizontalno pokrivanje	150°
Vertikalno pokrivanje	90°
Video formati	MJPEG,MPEG4
Format slike	.jpg
Tip senzora	CMOS
Napon napajanja	5V
Konekcija	USB
Dimenzije	26mm x 22mm x 18mm

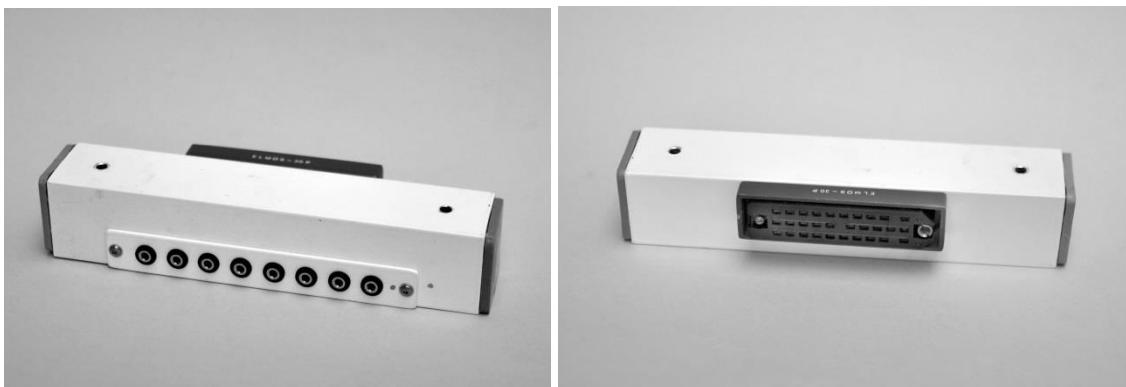


Slika 10.13 Izgled video kamere sa nosačem

P2.3 Adapter za povezivanje mikrofona na višeparične kablove

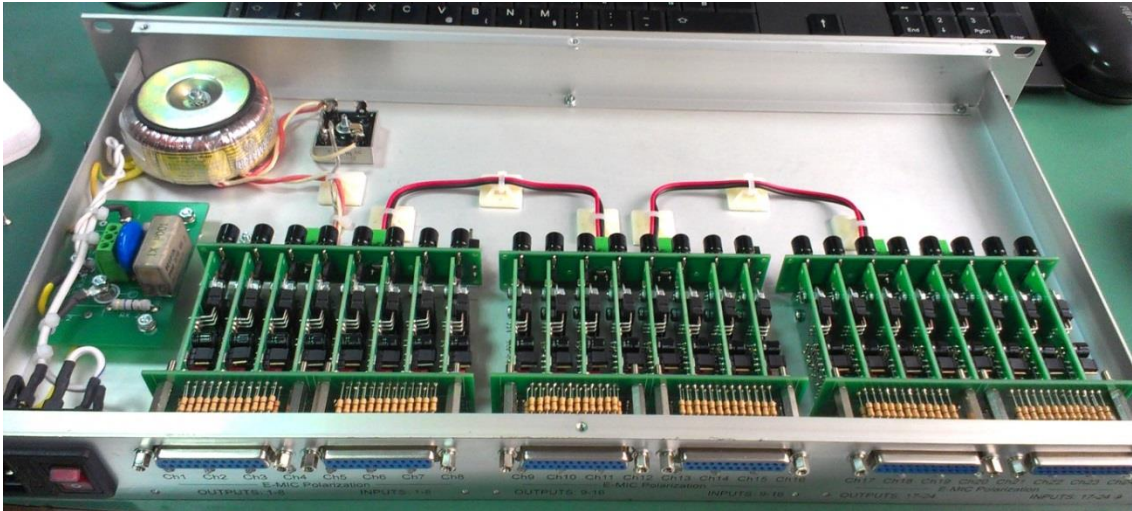


Slika 10.14 Tehnički crtež adaptera za povezivanje mikrofona sa višeparičnim kablovima

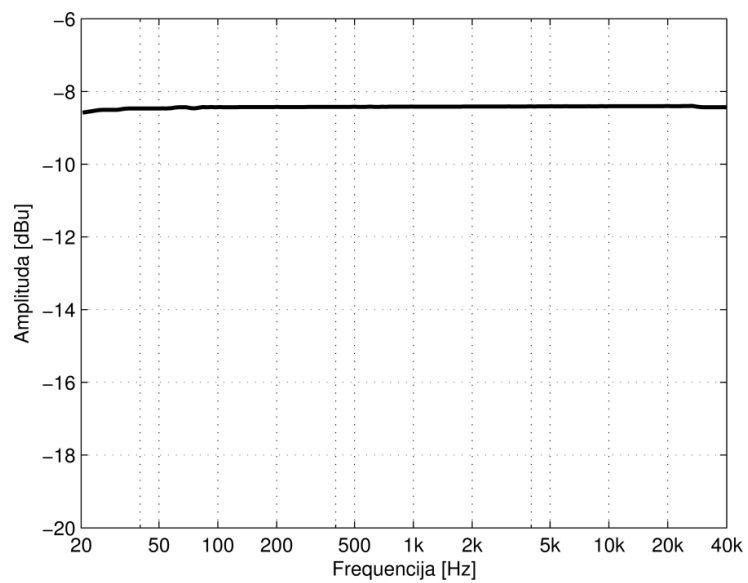


Slika 10.15 Izgled adaptera za povezivanje mikrofona sa višeparičnim kablovima

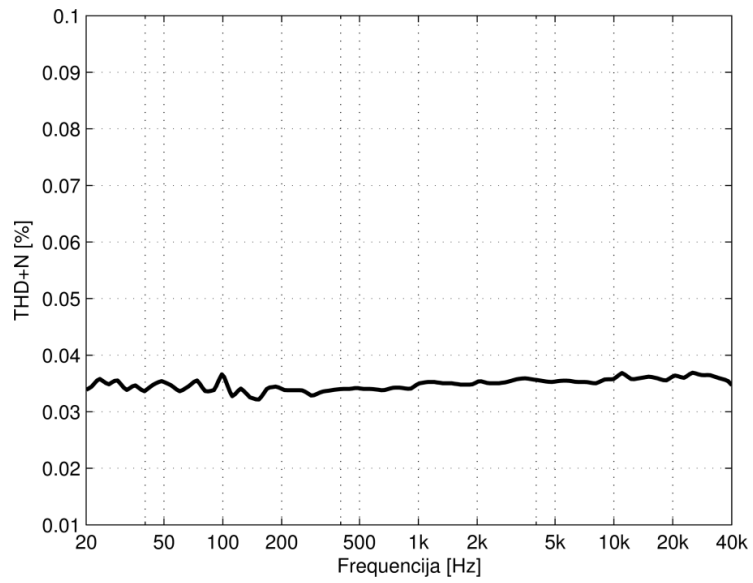
P2.4 Sistem za akviziciju



Slika 10.16 Izgled mikrofonskog predpojačavača bez poklopca



Slika 10.17 Amplitudska karakteristika jednog kanala pojačavača za pobudu nivoa -20dBu



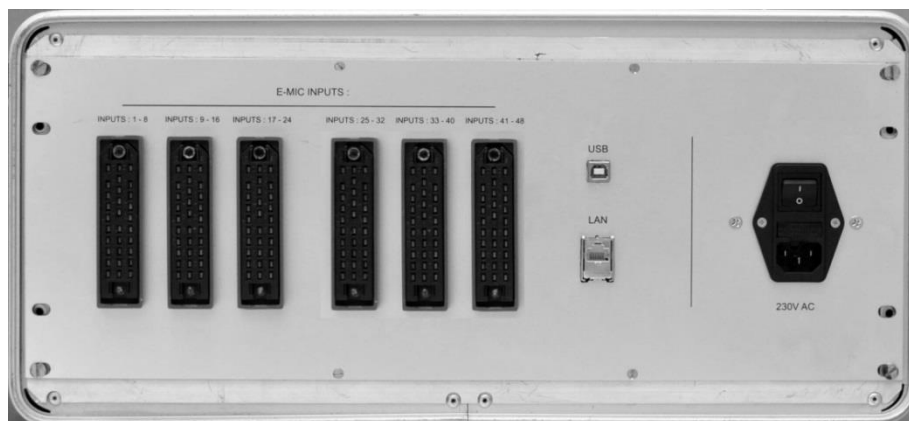
Slika 10.18 THD i šum snimljen na jednom kanalu predpojačavača



Slika 10.19 Izgled višekanalnog sistema za ADC



Slika 10.20 Izgled prednje strane uređaja ugrađenih u kutiju za transport



Slika 10.21 Izgled priključne ploče na zadnjoj strani kutije za transport



Slika 10.22 Izgled kutije za transport u koju su ugrađeni uređaji

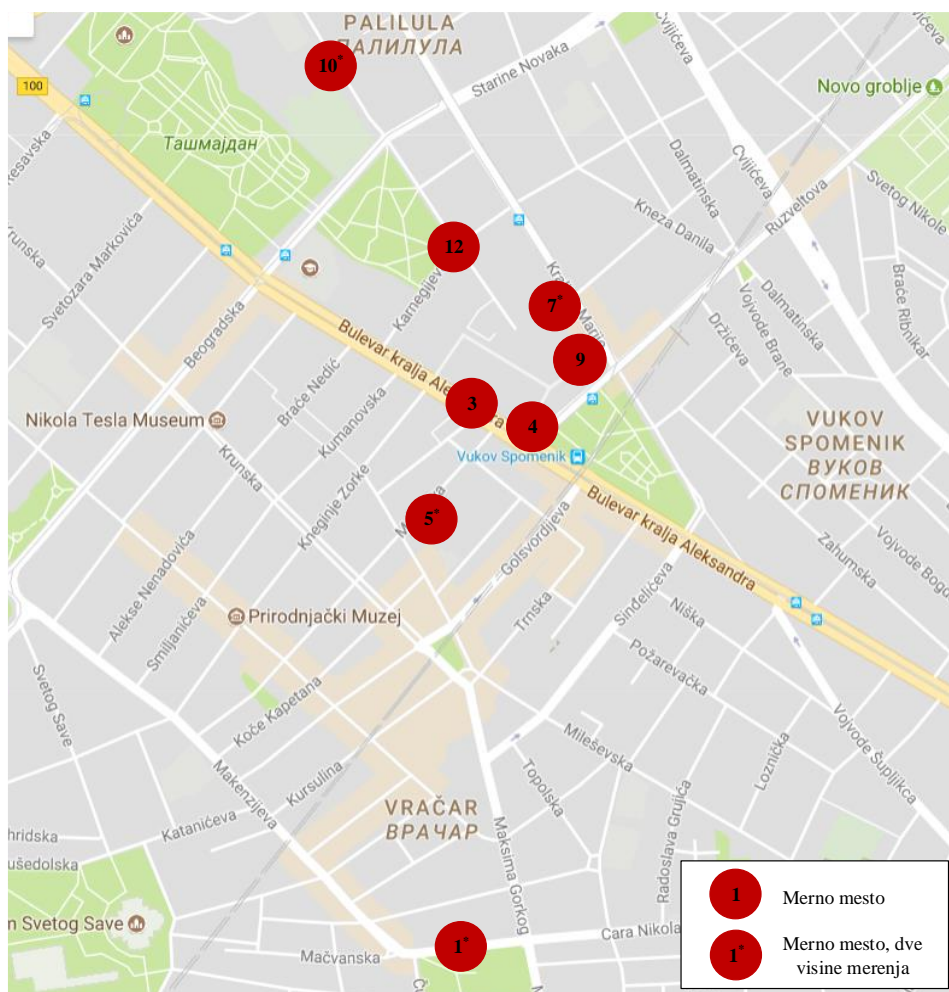
P.3 Obrazac za unos podataka sa merenja

Naziv merenja:	
Lokacija:	
Datum:	

Scenario 1:	
I Opis postavke:	<i>(opis terena naspram niza, specifičnosti...)</i>
II Podaci o merenju	
Rastojanje od niza:	<i>(normalno rastojanje od centra niza do početka ulice)</i>
Temperatura	
Visina na kojoj se nalazi niz:	<i>(normalno rastojanje od centra niza do podloge)</i>
Širina ulice:	
Broj saobraćajnih traka:	
Vrste vozila koje se javljaju:	
III File-ovi:	Naziv snimka: <i>(naziv file-a)</i>
	Naziv slike: <i>(naziv file-a)</i>

P.4 Prikaz lokacija na kojima su izvršena merenja

U ovom prilogu prikazane su lokacije na kojima je vršena analiza spoljašnje buke na fasadi zgrada primenom mikrofonskog niza. Prikazani su izgled lokacije na kojoj je postavljen mikrofonski niz, kao i profil terena u kom se vrši merenje sa označenim karakterističnim delovima i njihovim dimenzijama. Na Slici 10.23 prikazana je mapa grada sa označenim lokacijama gde su vršena merenja, a u Tabeli 10.2 dati su detalji o lokaciji mernog mesta.

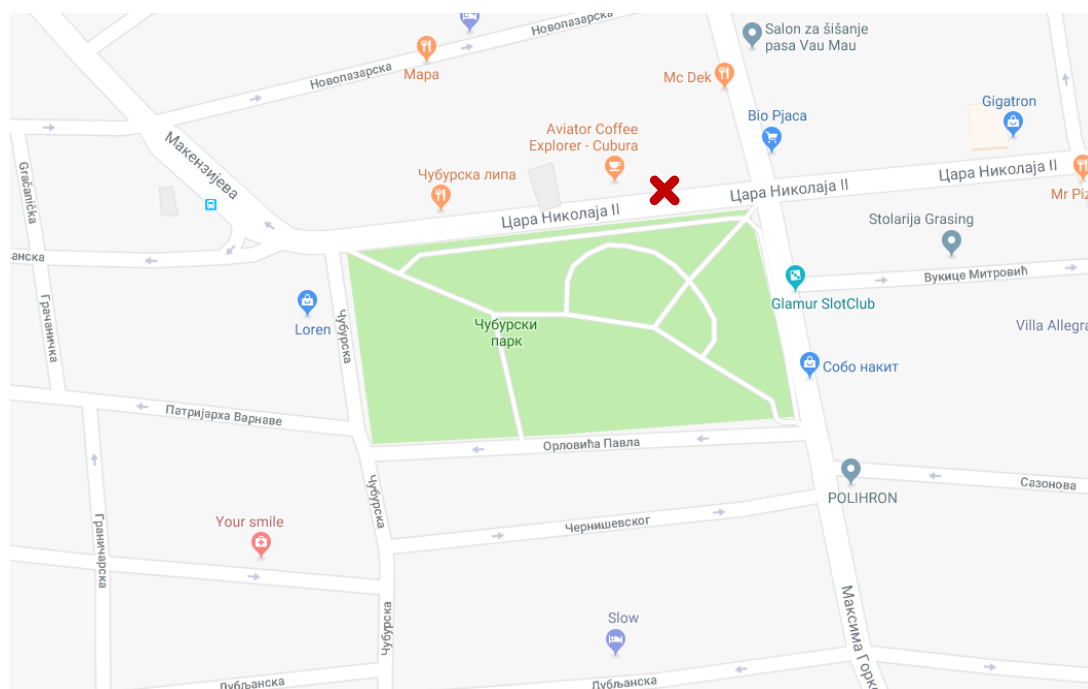


Slika 10.23 Lokacije u Beogradu na kojima su izvršena merenje [57]

Tabela 10.2 Lokacije u Beogradu na kojima su izvršena merenje

Redni broj merenja	Mesto merenja (Ulica)
1*	Zgrada Bit (Cara Nikolaja II 21)
3	Zgrada tehničkih fakulteta (Bulevar kralja Aleksandra 73 – glavni ulaz)
4	Zgrada tehničkih fakulteta (Bulevar kralja Aleksandra 73 – bočno)
5*	Zgrada Molerova (Molerova 70)
7*	Zgrada Zavoda za fiziku (Kraljice Marije 16)
9	Zgrada Zavoda za fiziku (Ruzveltova 1a)
10*	Zgrada Ilije Garašanina 16
12	Zgrada Tehnološkog fakulteta (Karnegijeva 4)

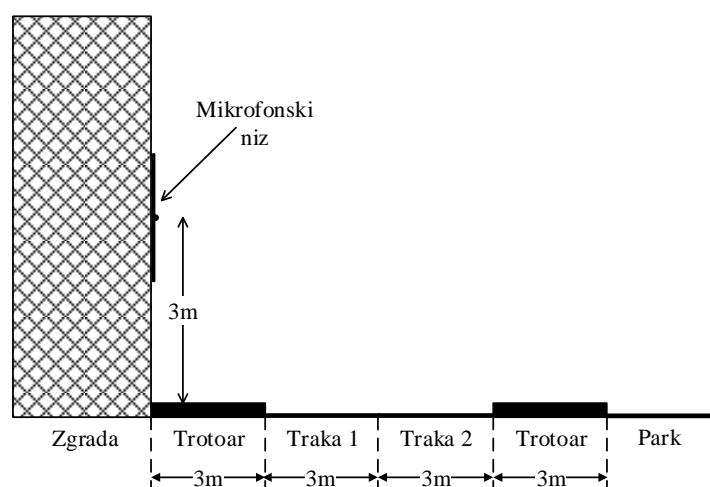
P4.1 Zgrada Bit (Ulica cara Nikolaja II 21)



Slika 10.24 Položaj ulice na mapi grada i pozicija mernog mesta u ulici



Slika 10.25 Mikrofonski niz na fasadi zgrade (gore) i profil ulice u kojoj je izvršeno merenje (dole)

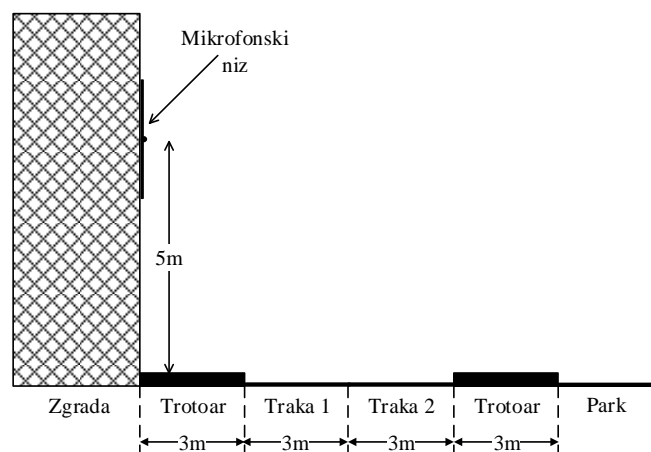


Slika 10.26 Profil terena sa bitnim elementima i njihovim dimenzijama

P4.2 Zgrada Bit – visina 2 (Ulica cara Nikolaja II 21)

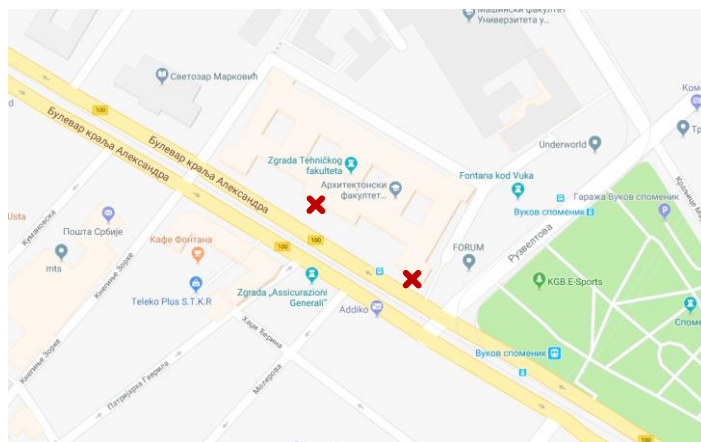


Slika 10.27 Mikrofonski niz na fasadi zgrade (gore) i profil ulice u kojoj je izvršeno merenje (dole)



Slika 10.28 Profil terena sa bitnim elementima i njihovim dimenzijama

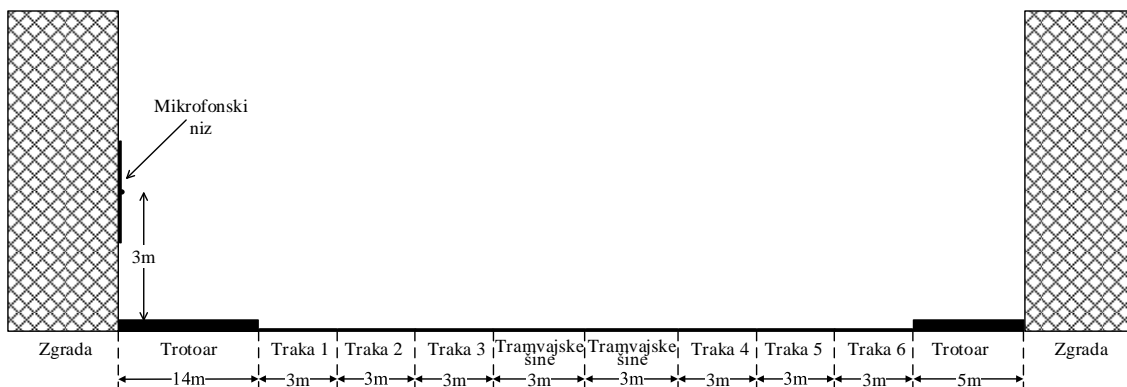
P4.3 Zgrada tehničkih fakulteta (Ulica bulevar kralja Aleksandra 73 glavni ulaz)



Slika 10.29 Položaj ulice na mapi grada i pozicija mernog mesta (mernih mesta) u ulici



Slika 10.30 Mikrofonski niz na fasadi zgrade (gore) i profil ulice u kojoj je izvršeno merenje (dole)

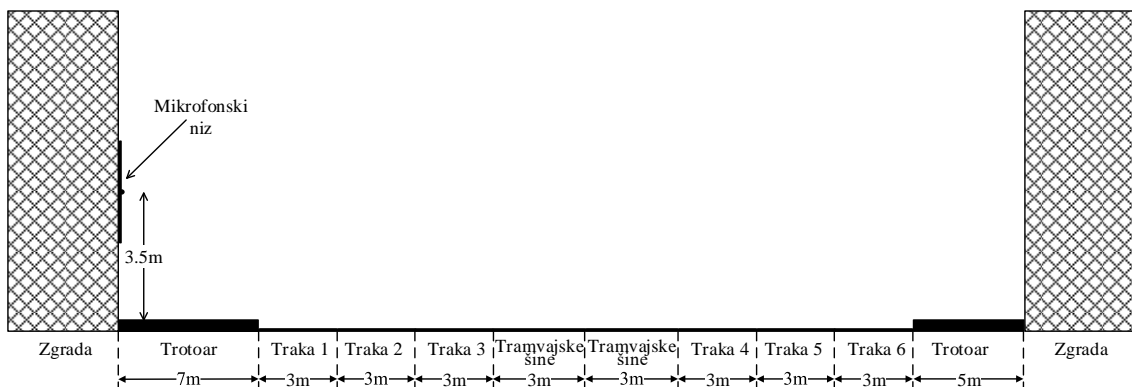


Slika 10.31 Profil terena sa bitnim elementima i njihovim dimenzijama

P4.4 Zgrada tehničkih fakulteta (Ulica bulevar kralja Aleksandra 73 bočno)

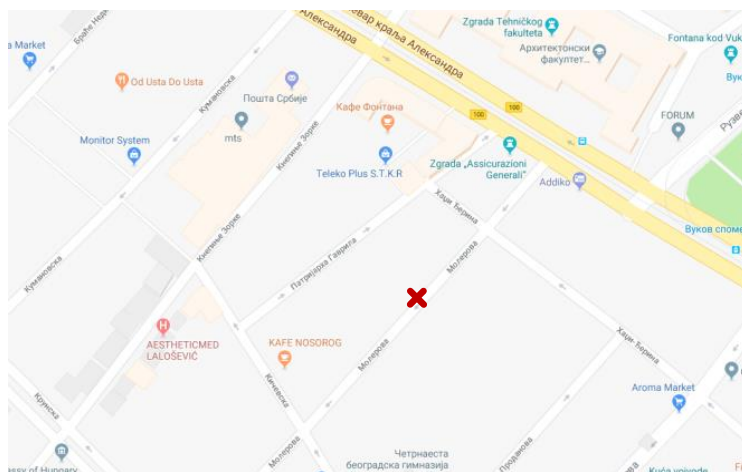


Slika 10.32 Mikrofonski niz na fasadi zgrade (gore) i profil ulice u kojoj je izvršeno merenje (dole)



Slika 10.33 Profil terena sa bitnim elementima i njihovim dimenzijama

P4.5 Zgrada Molerova (Ulica Molerova 70)

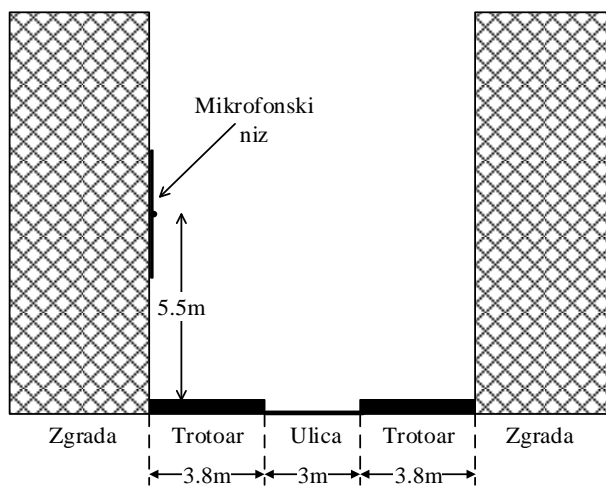


Slika 10.34 Položaj ulice na mapi grada i pozicija mernog mesta u ulici





Slika 10.35 Mikrofonski niz na fasadi zgrade (gore) i profil ulice u kojoj je izvršeno merenje (dole)

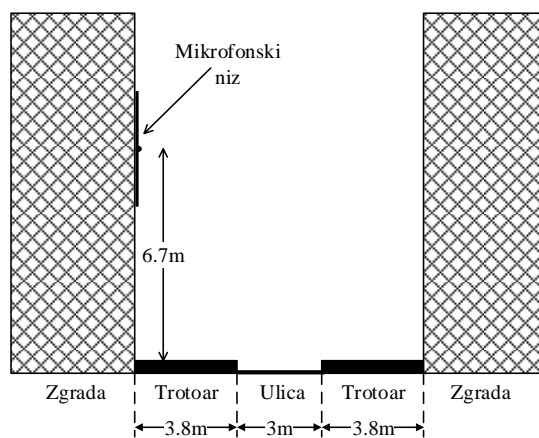


Slika 10.36 Profil terena sa bitnim elementima i njihovim dimenzijama

P4.6 Zgrada Molerova – Visina 2 (Ulica Molerova 70)

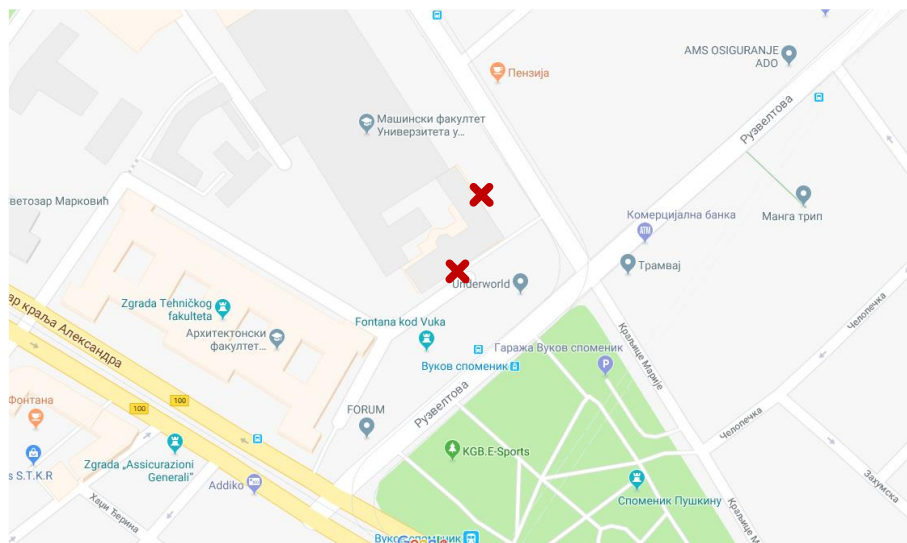


Slika 10.37 Mikrofonski niz na fasadi zgrade (gore) i profil ulice u kojoj je izvršeno merenje (dole)



Slika 10.38 Profil terena sa bitnim elementima i njihovim dimenzijama

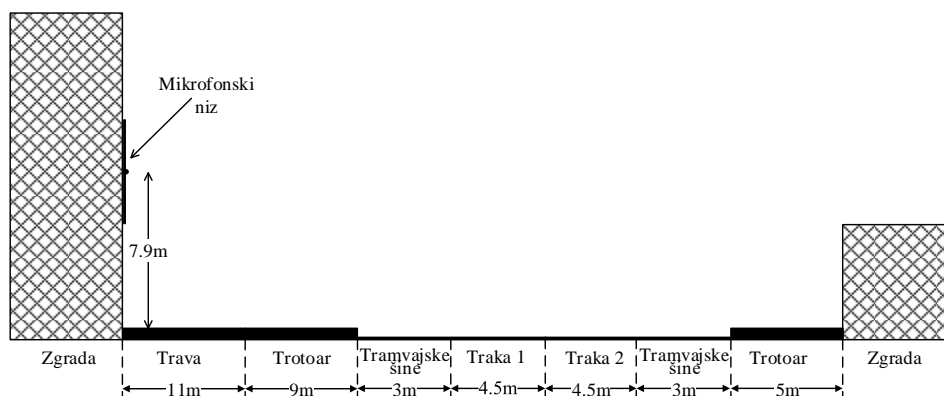
P4.7 Zgrada Zavoda za fiziku (Ulica Kraljice Marije 16)



Slika 10.39 Položaj ulice na mapi grada i pozicija mernog mesta u ulici



Slika 10.40 Mikrofonski niz na fasadi zgrade (gore) i profil ulice u kojoj je izvršeno merenje (dole)

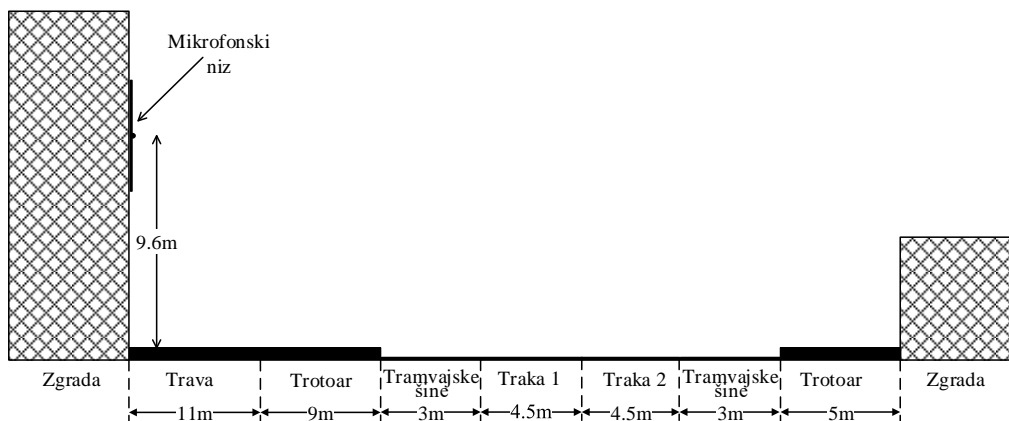


Slika 10.41 Profil terena sa bitnim elementima i njihovim dimenzijama

P4.8 Zgrada Zavoda za fiziku – Visina 2 (Ulica Kraljice Marije 16)



Slika 10.42 Mikrofonski niz na fasadi zgrade (gore) i profil ulice u kojoj je izvršeno merenje (dole)

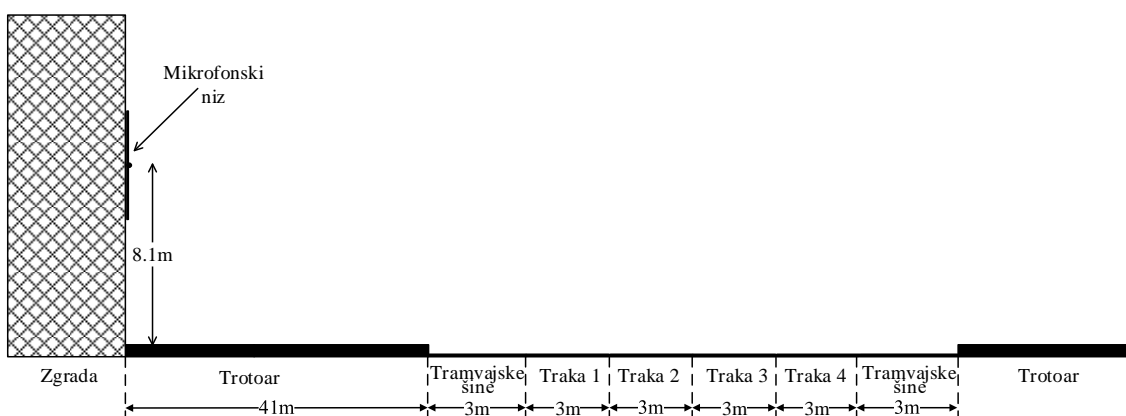


Slika 10.43 Profil terena sa bitnim elementima i njihovim dimenzijama

P4.9 Zgrada Zavoda za fiziku – (Ulica Ruzveltova 1a)

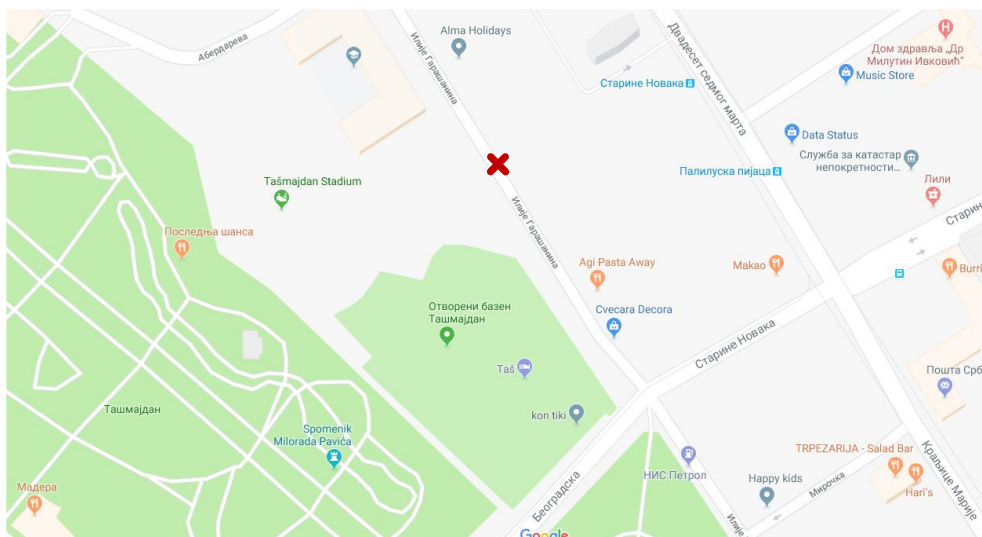


Slika 10.44 Mikrofonski niz na fasadi zgrade

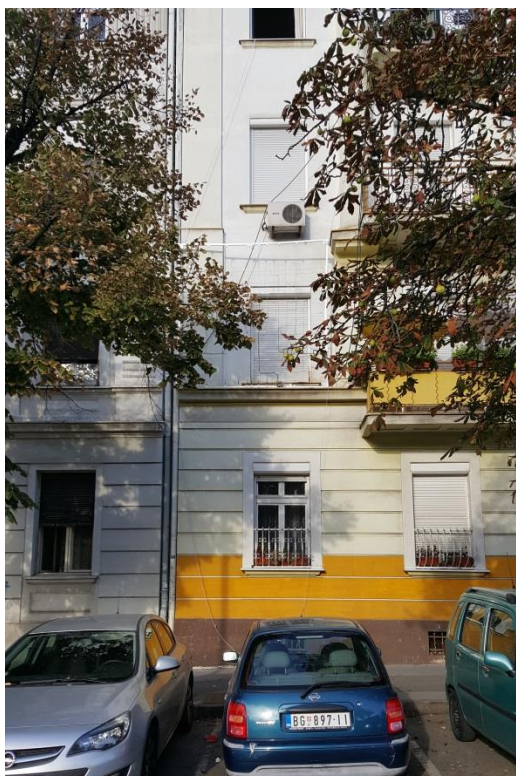


Slika 10.45 Profil terena sa bitnim elementima i njihovim dimenzijama

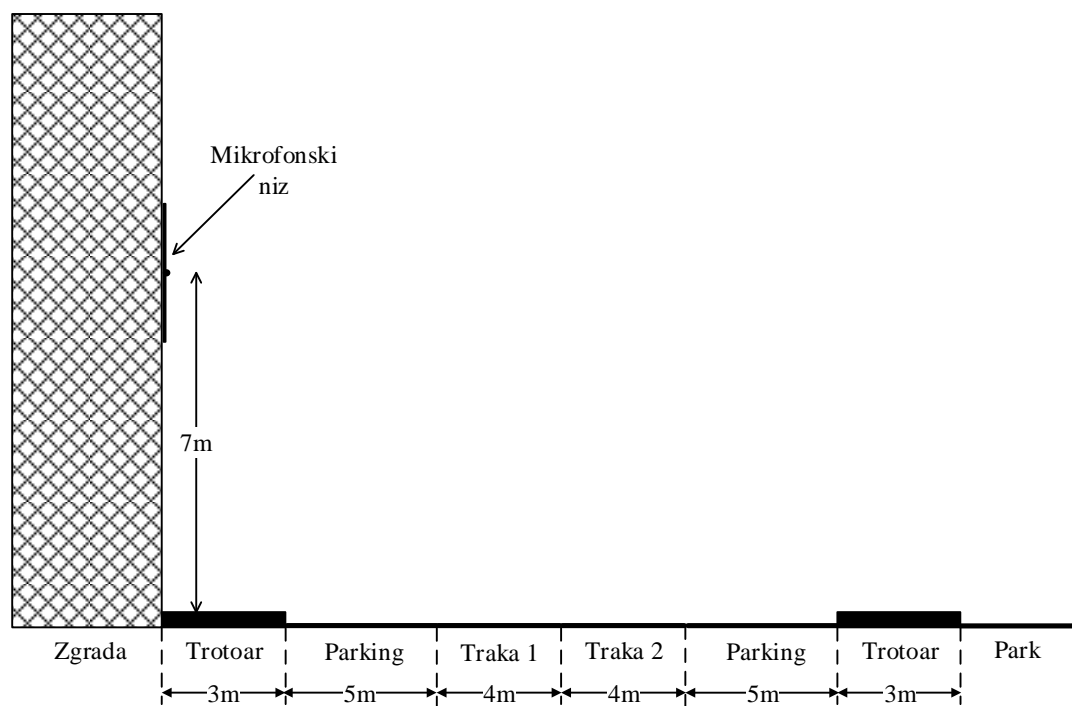
P4.10 Илије Гарашанина



Slika 10.46 Položaj ulice na mapi grada i pozicija mernog mesta u ulici



Slika 10.47 Mikrofonski niz na fasadi zgrade (levo) i profil ulice u kojoj je izvršeno merenje (desno)

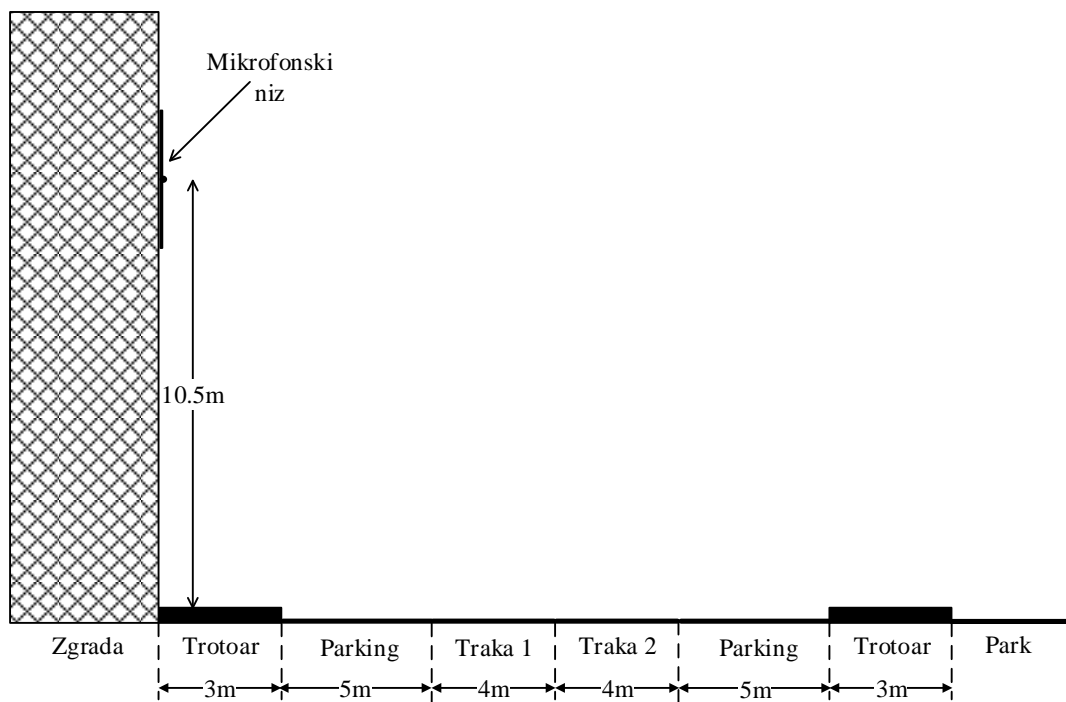


Slika 10.48 Profil terena sa bitnim elementima i njihovim dimenzijama

P4.11 Ilije Garašanina – visina 2

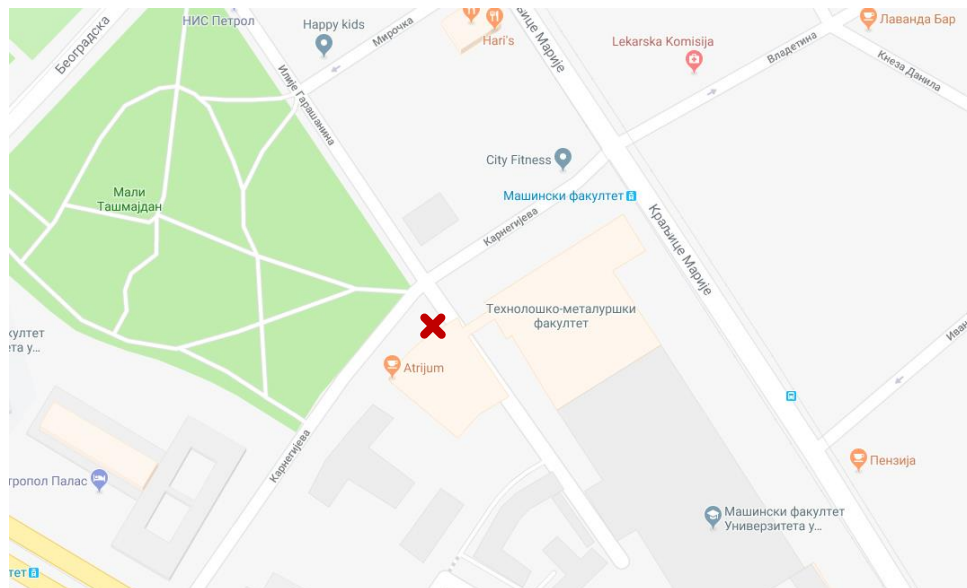


Slika 10.49 Mikrofonski niz na fasadi zgrade (levo) i profil ulice u kojoj je izvršeno merenje (desno)



Slika 10.50 Profil terena sa bitnim elementima i njihovim dimenzijama

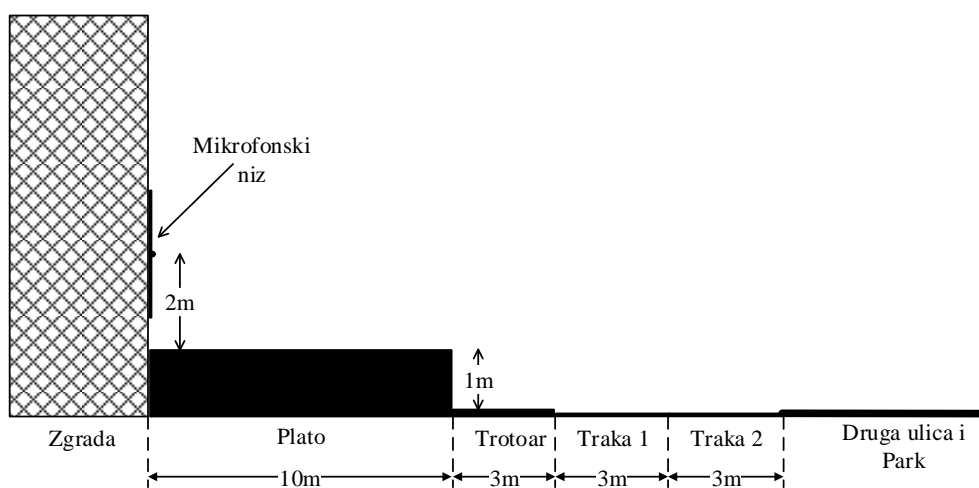
P4.12 Zgrada Tehnološkog fakulteta (Ulica Karnegijeva 4)



Slika 10.51 Položaj ulice na mapi grada i pozicija mernog mesta u ulici



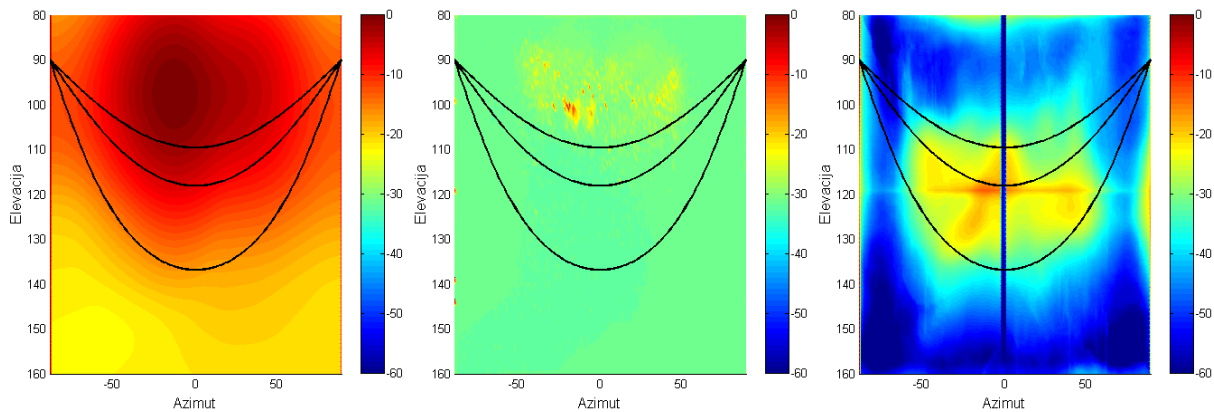
Slika 10.52 Mikrofonski niz na fasadi zgrade (gore) i profil ulice u kojoj je izvršeno merenje (dole)



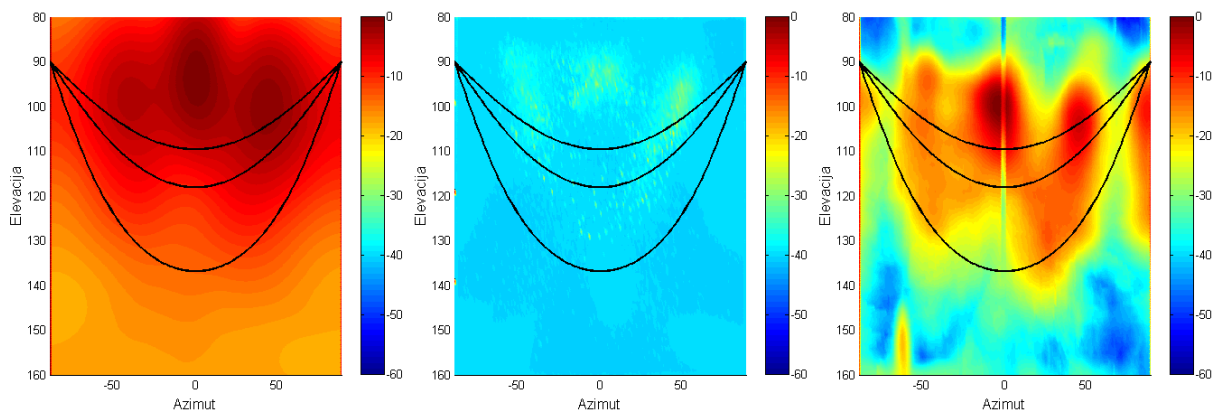
Slika 10.53 Profil terena sa bitnim elementima i njihovim dimenzijama

P.5 Rezultati algoritama za obradu signala sa mikrofonskog niza

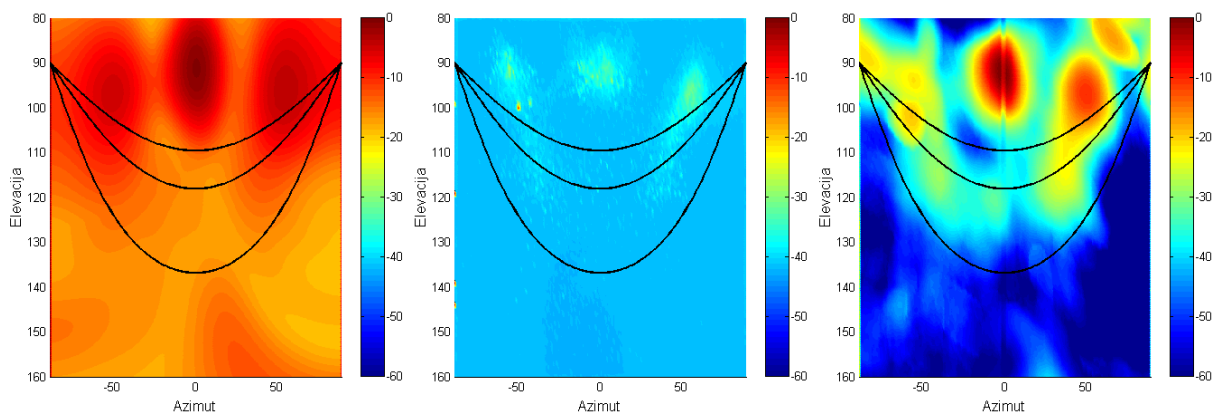
P5.1 Zgrada Bit (Cara Nikolaja II 21)



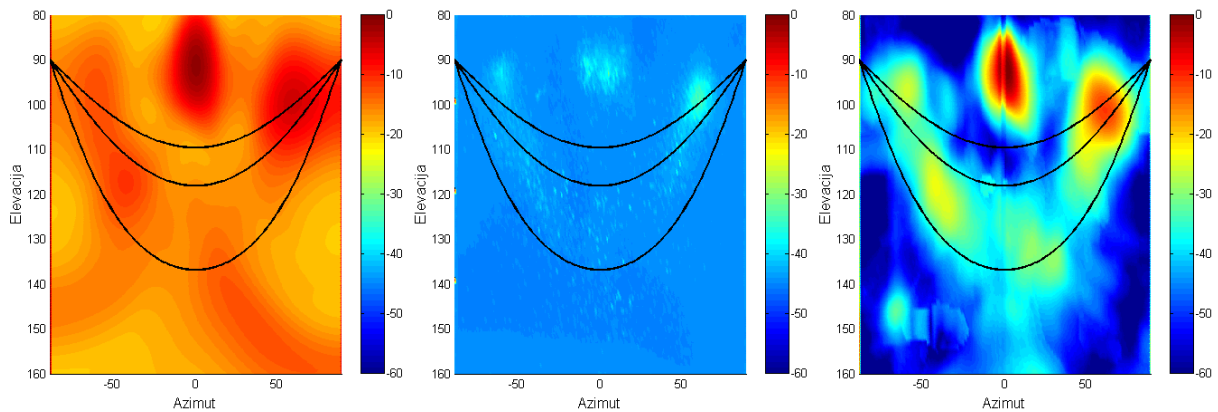
Slika 10.54 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



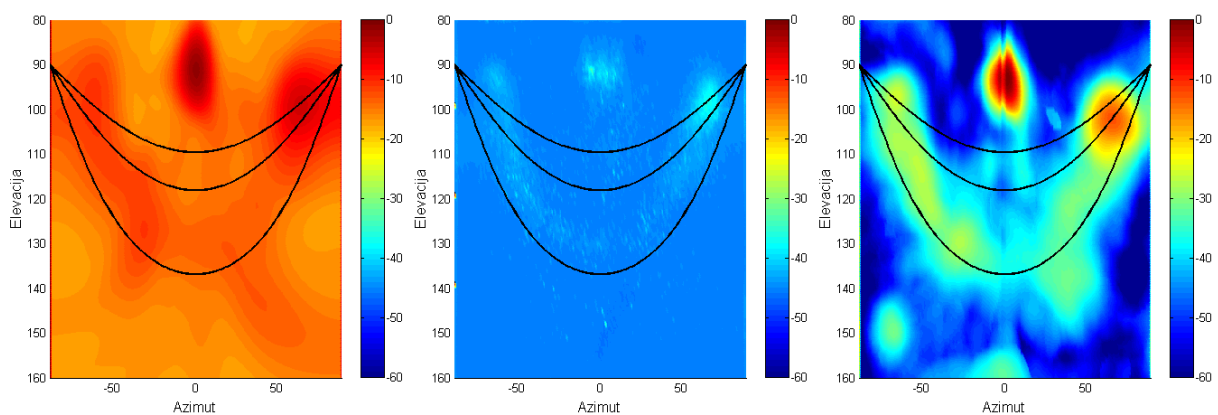
Slika 10.55 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



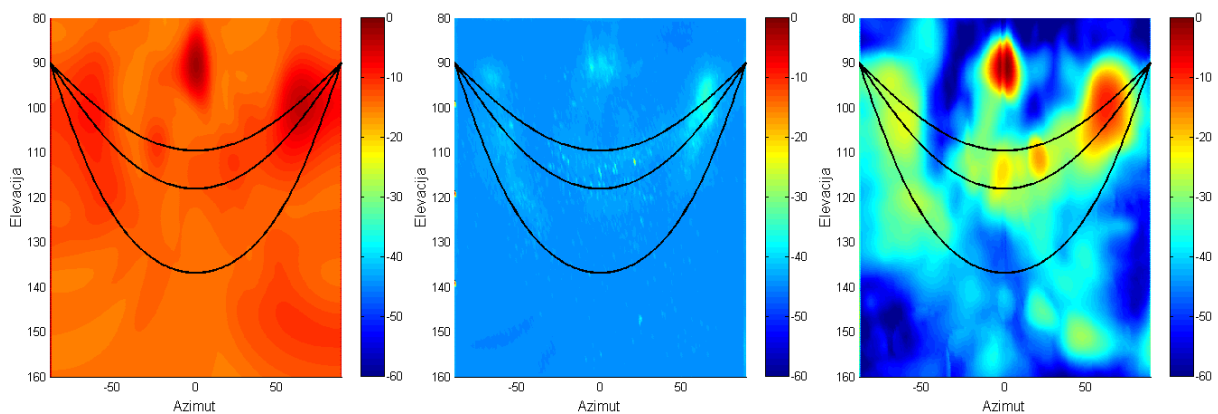
Slika 10.56 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



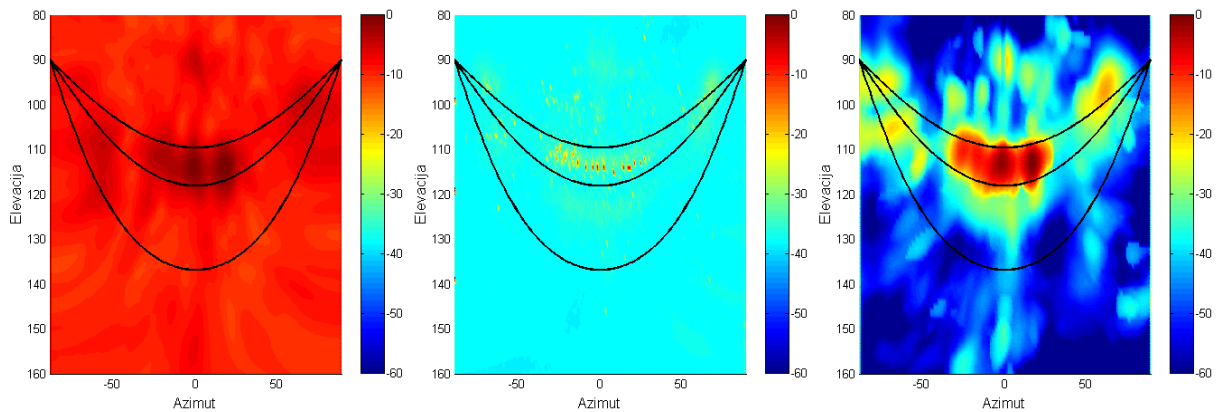
Slika 10.57 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



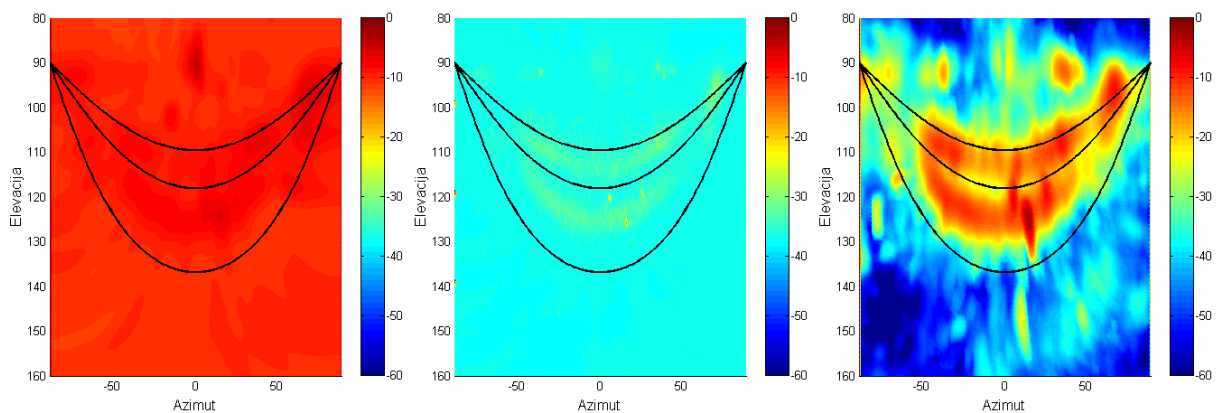
Slika 10.58 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



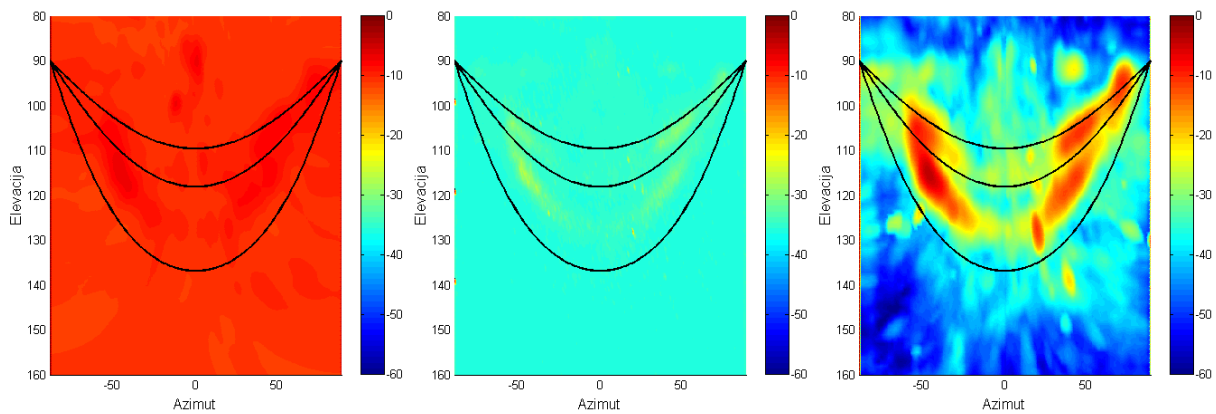
Slika 10.59 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



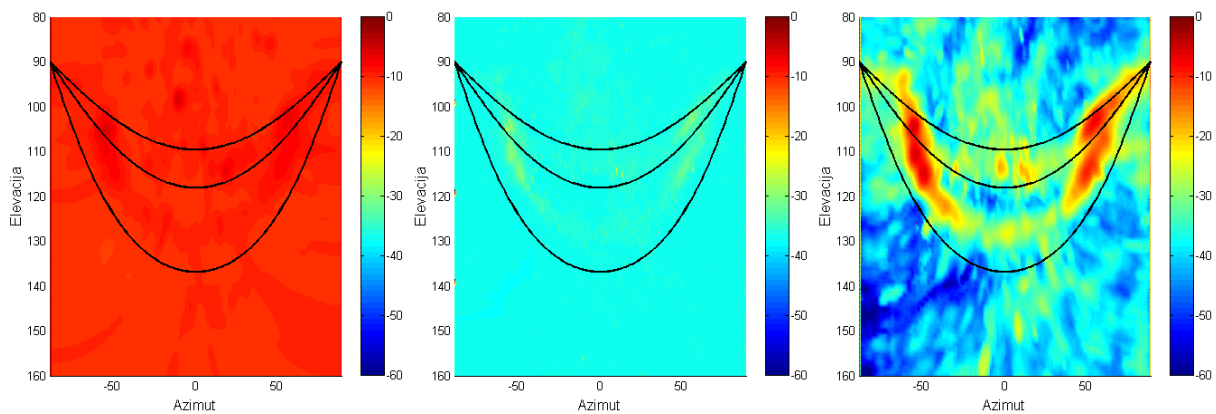
Slika 10.60 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.61 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz

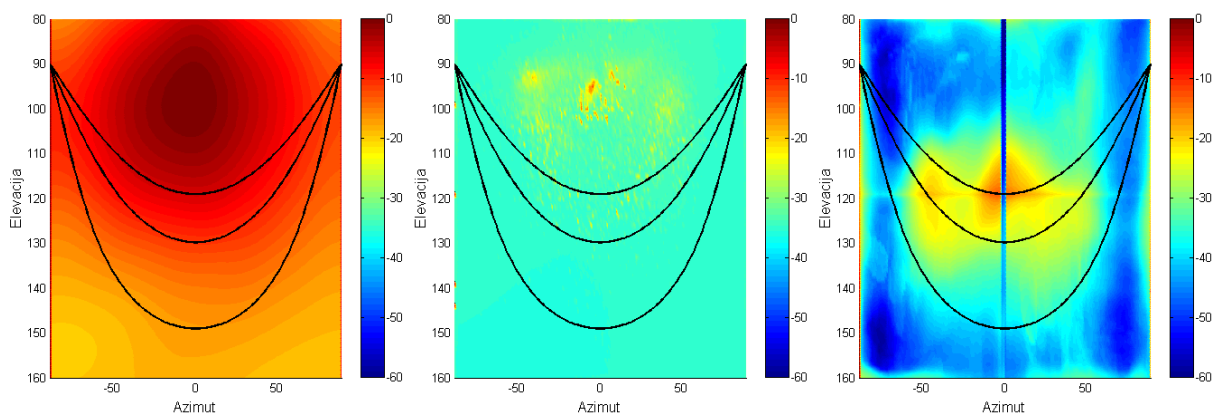


Slika 10.62 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz

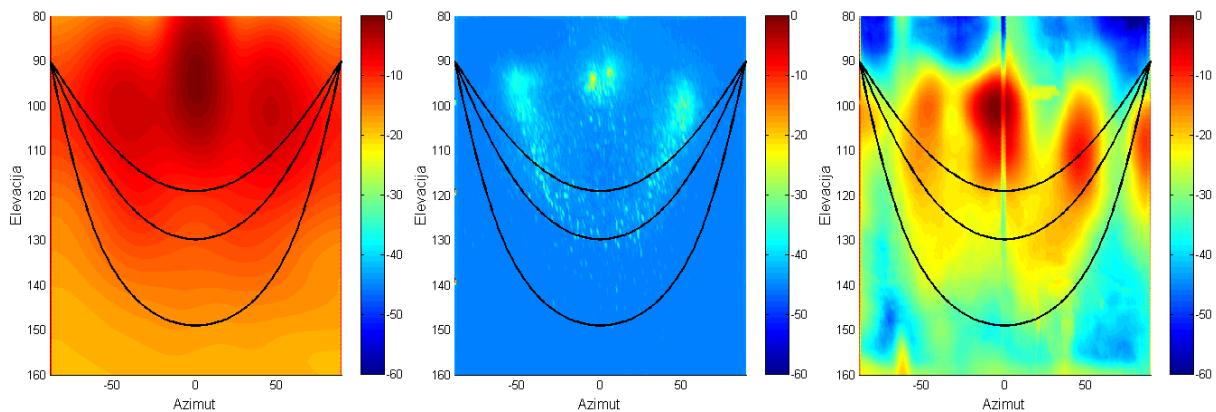


Slika 10.63 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

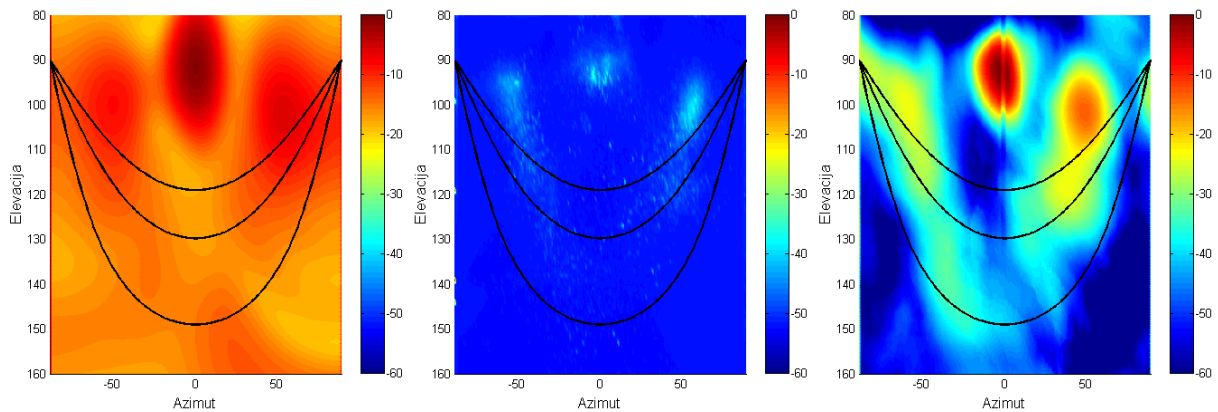
P5.2 Zgrada Bit (Cara Nikolaja II 21)



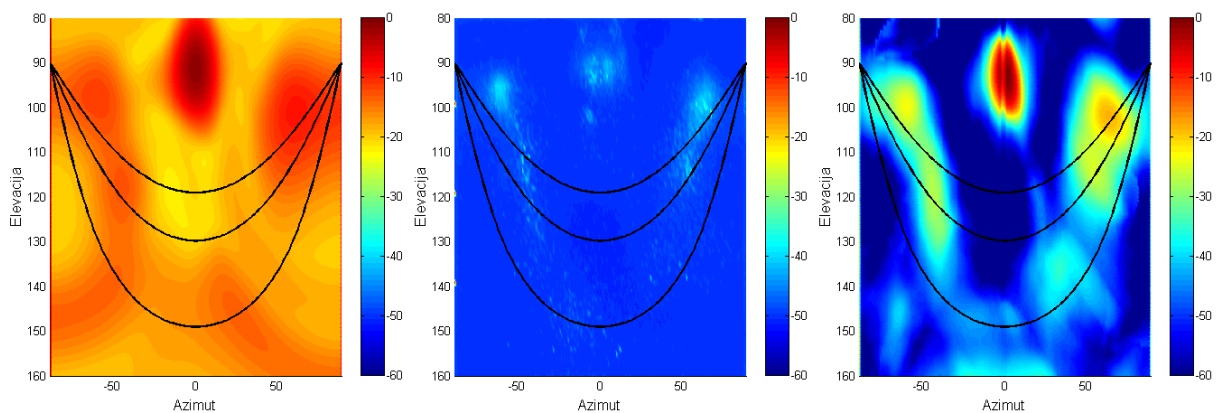
Slika 10.64 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



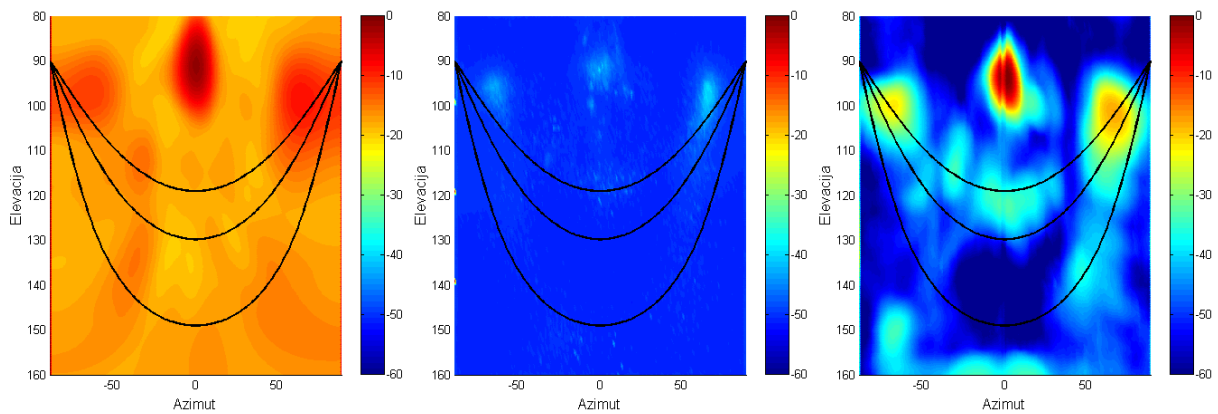
Slika 10.65 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



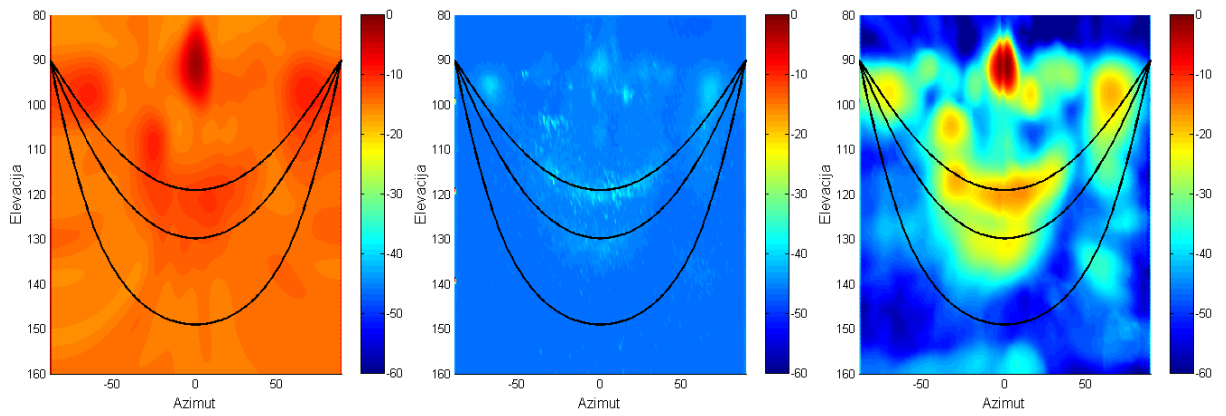
Slika 10.66 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



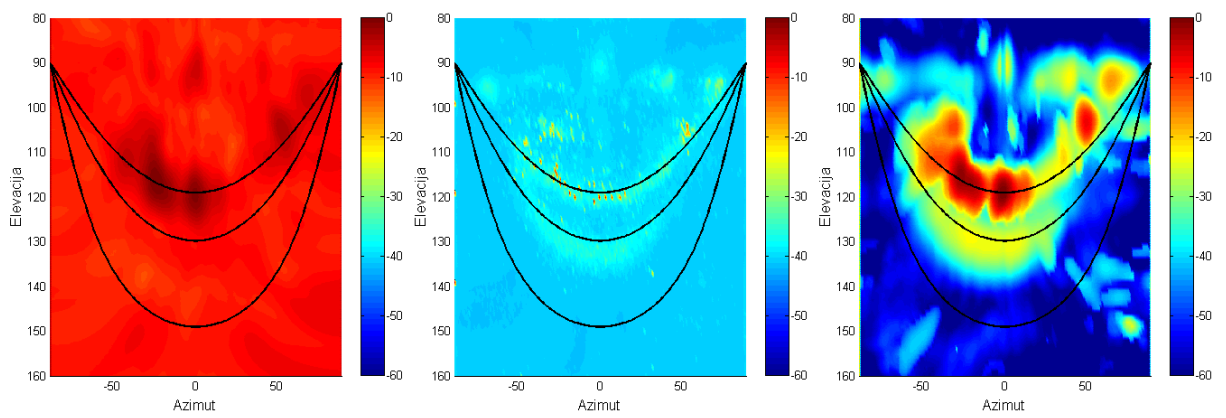
Slika 10.67 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



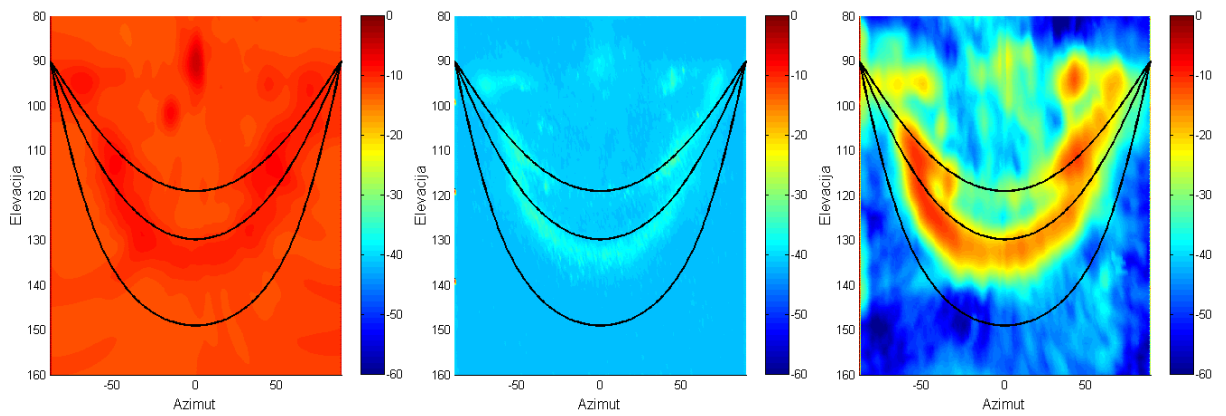
Slika 10.68 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



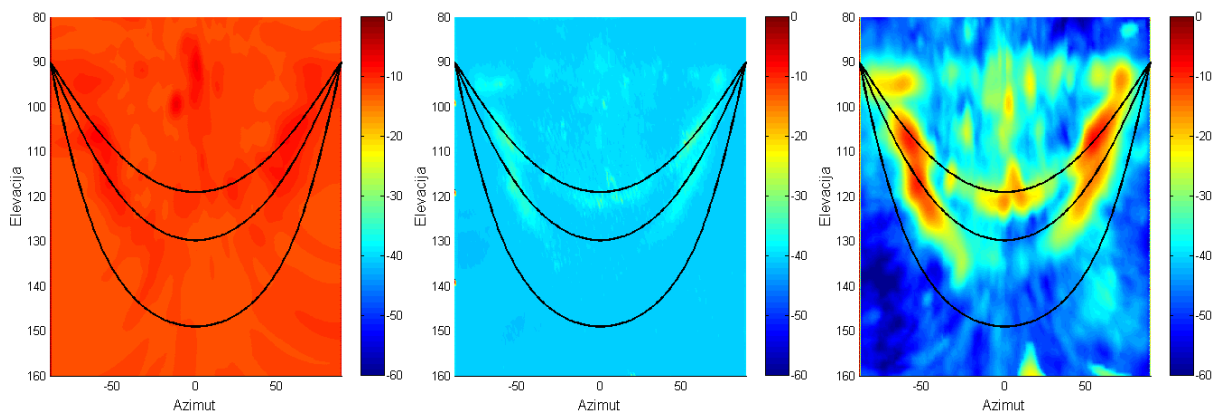
Slika 10.69 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



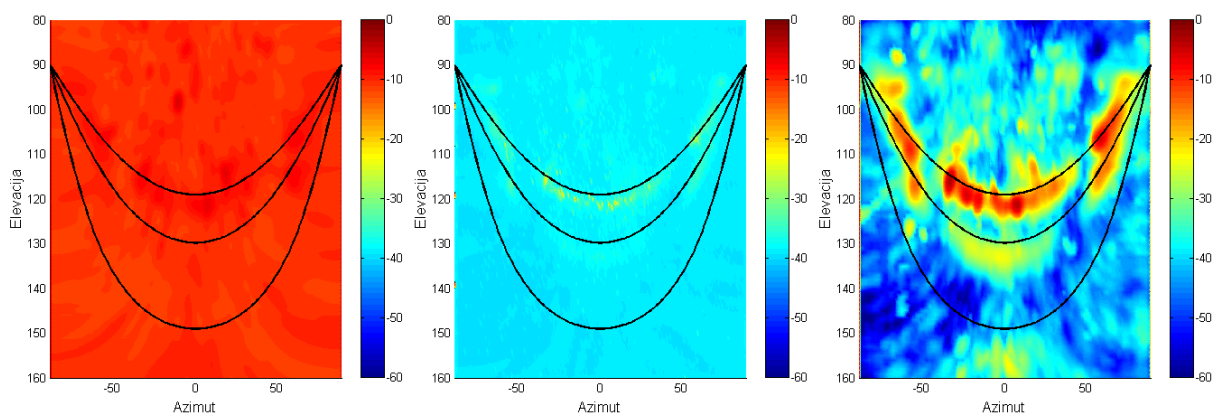
Slika 10.70 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.71 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz

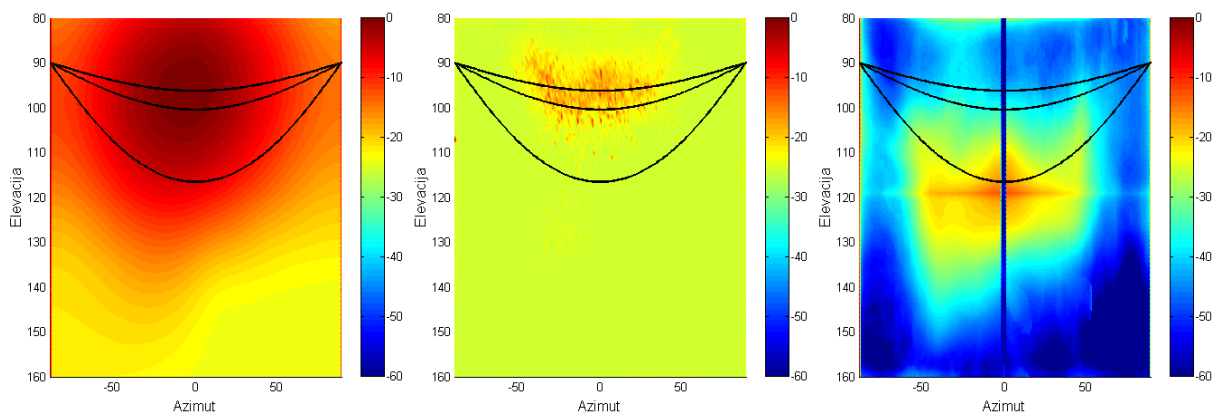


Slika 10.72 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz

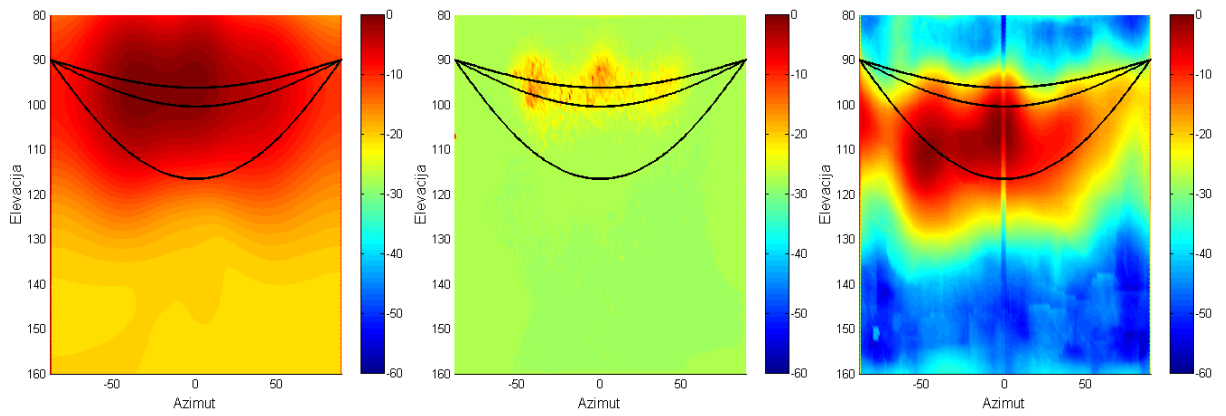


Slika 10.73 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

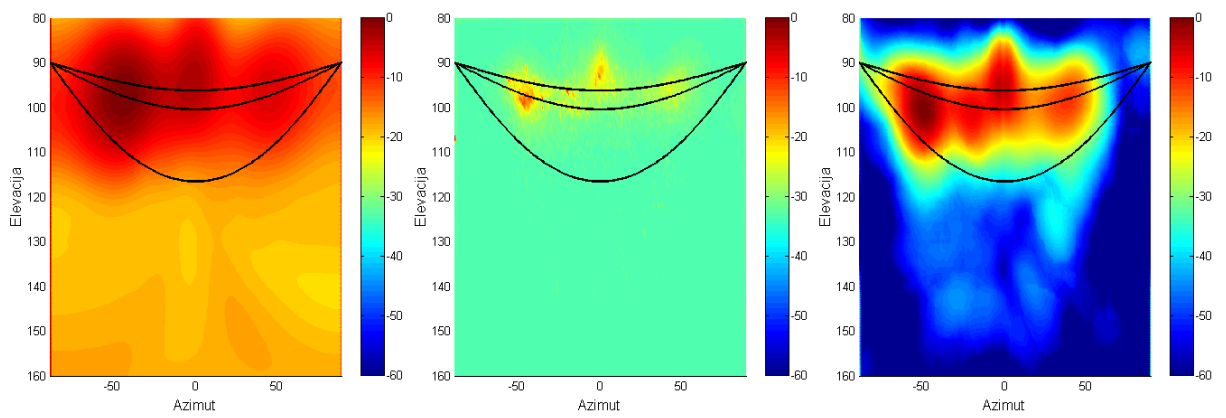
P5.3 Zgrada tehničkih fakulteta (Bulevar kralja Aleksandra 73 – bočno)



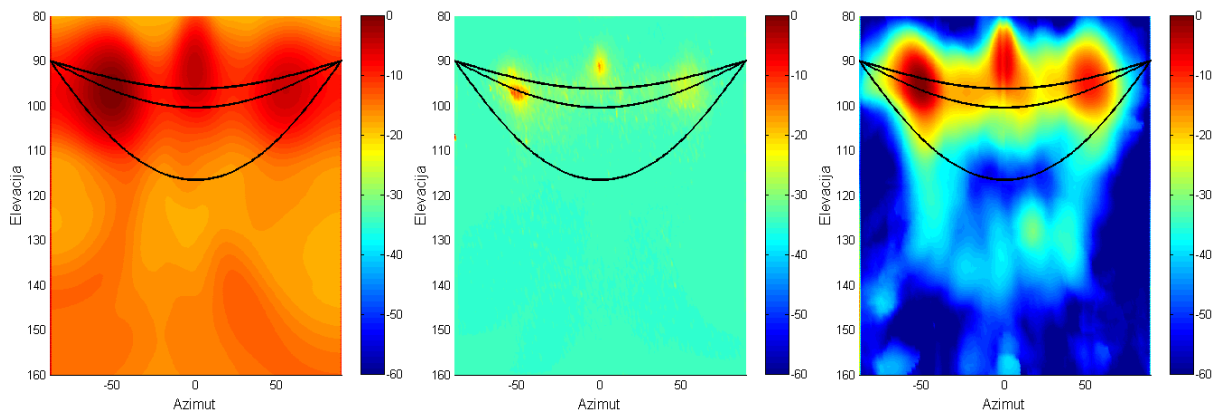
Slika 10.74 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



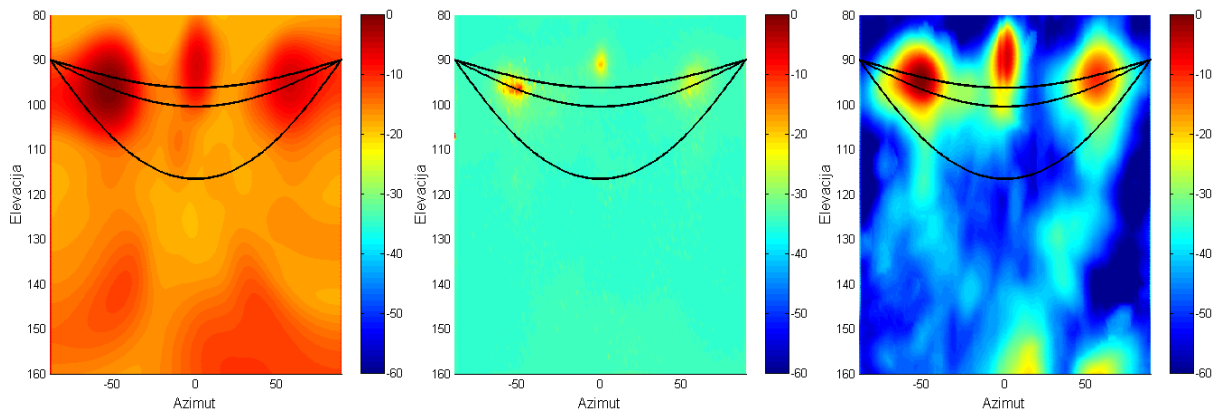
Slika 10.75 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



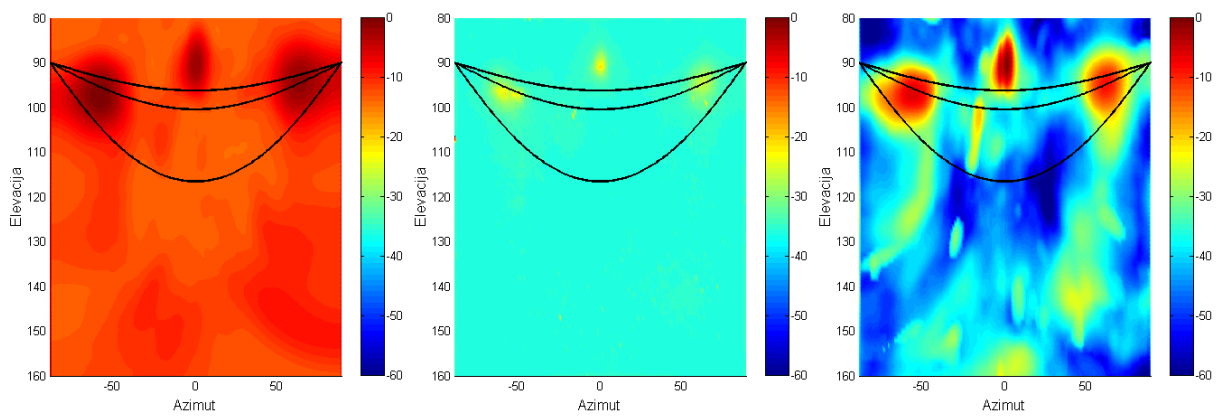
Slika 10.76 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



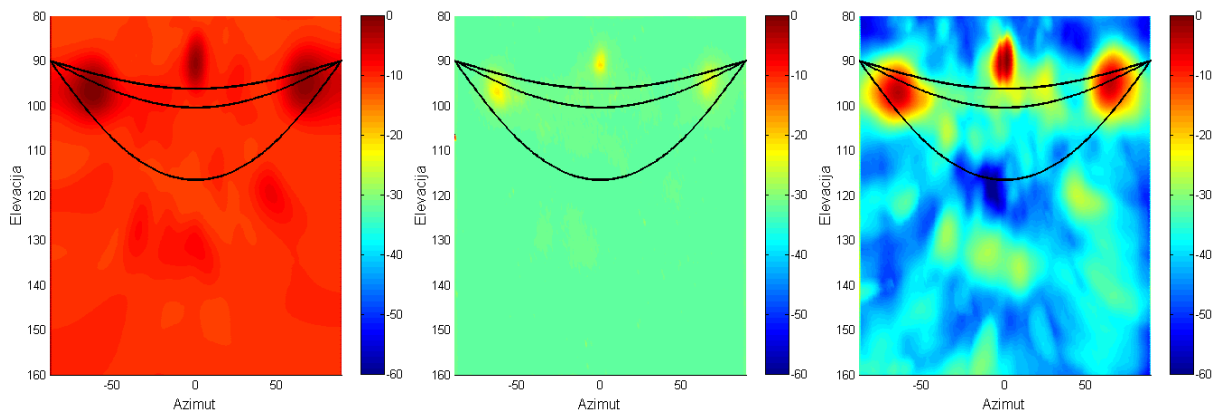
Slika 10.77 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



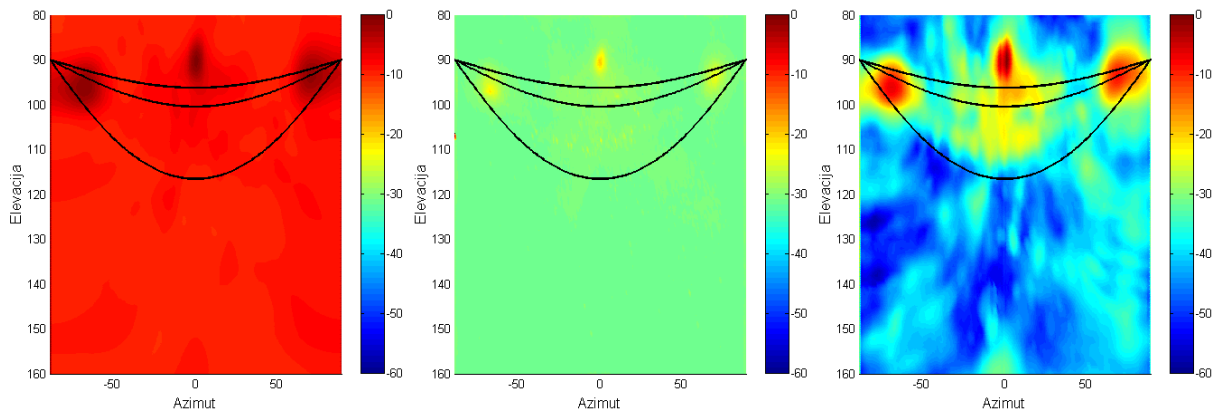
Slika 10.78 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



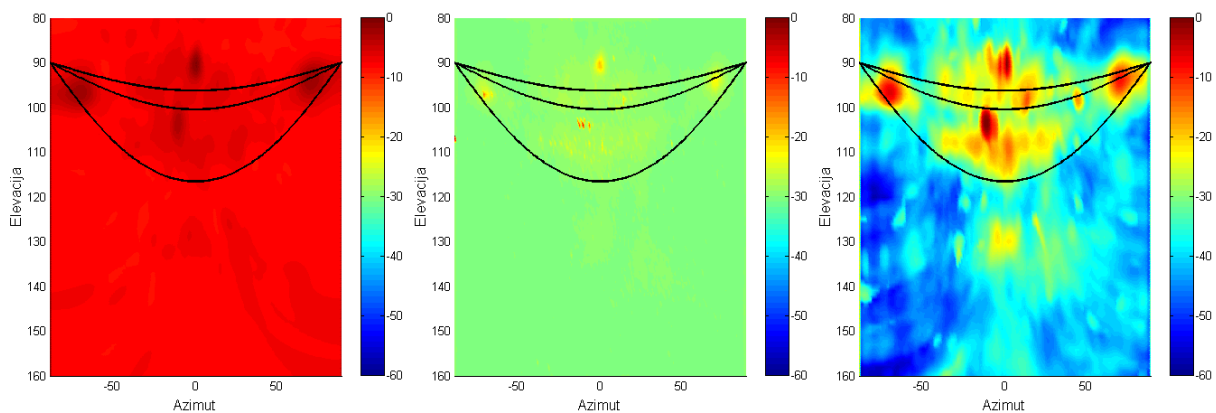
Slika 10.79 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



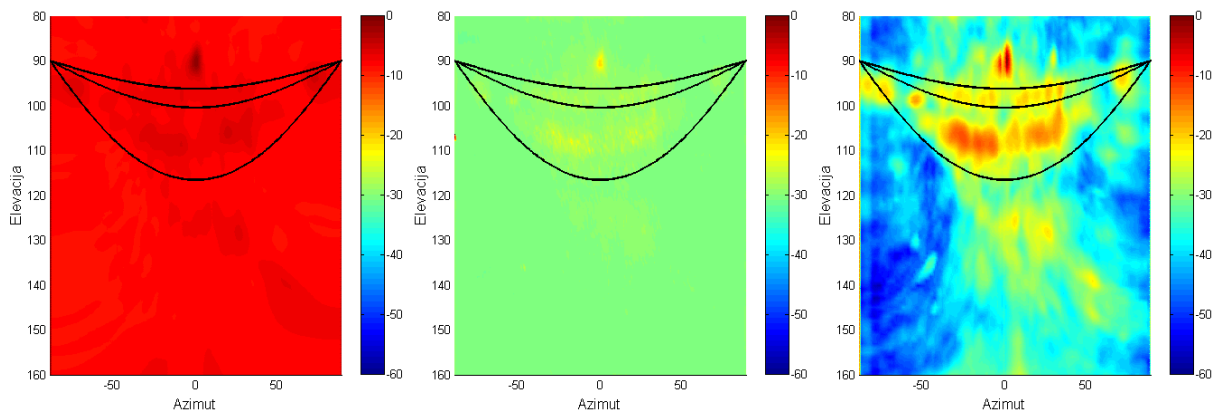
Slika 10.80 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.81 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz

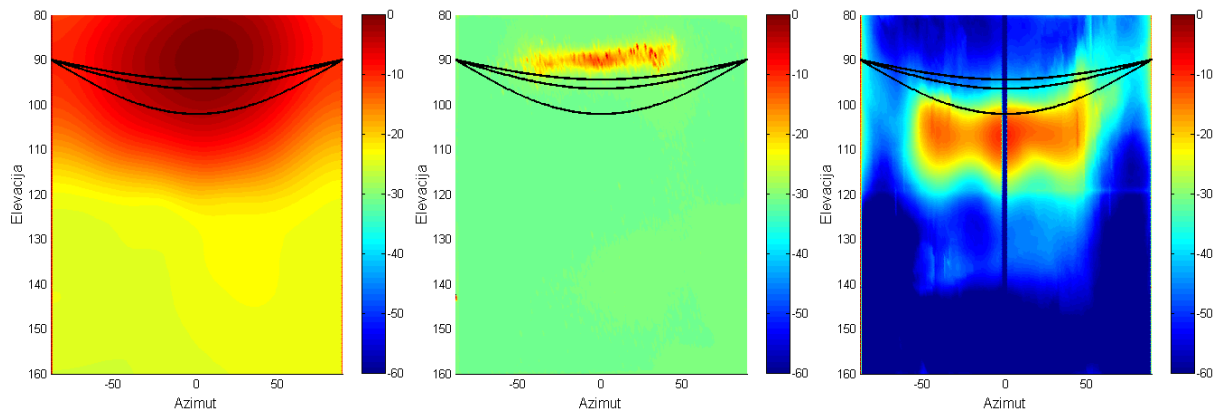


Slika 10.82 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz

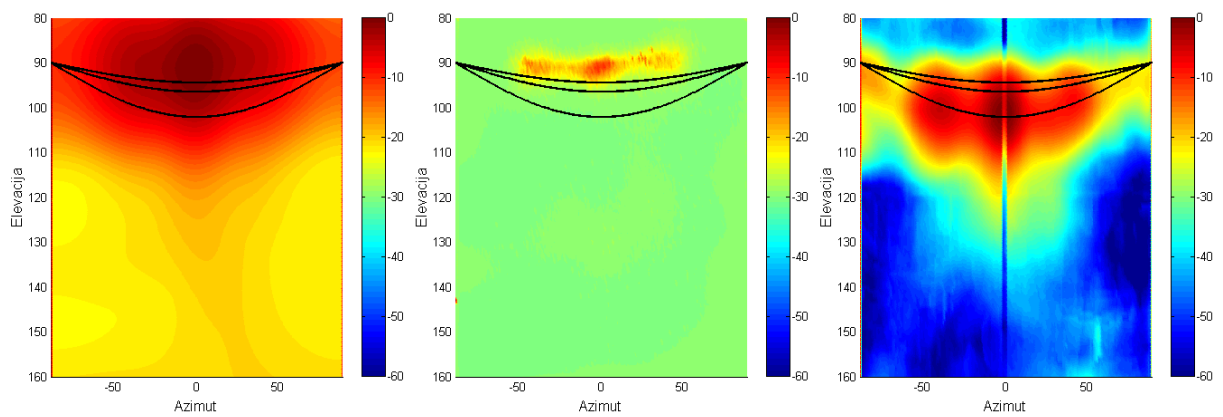


Slika 10.83 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

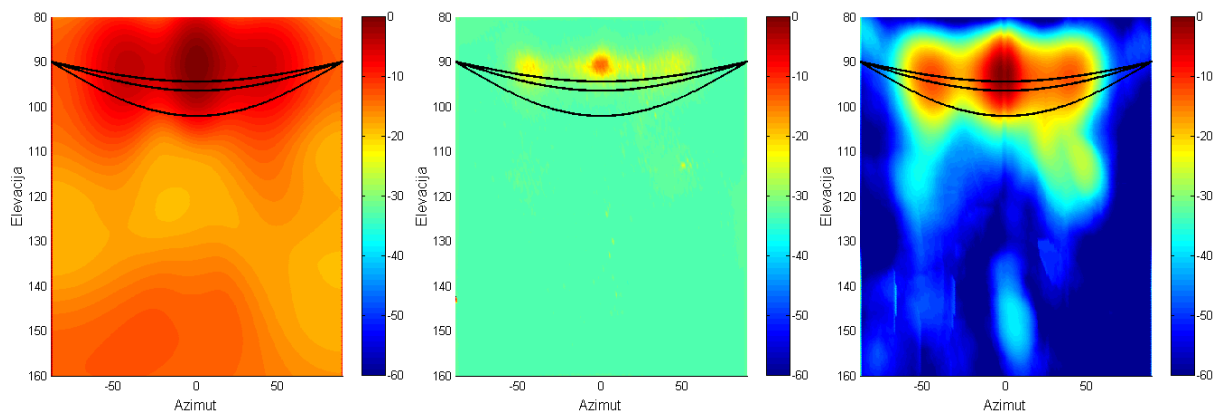
P5.4 Zgrada tehničkih fakulteta (Bulevar kralja Aleksandra 73)



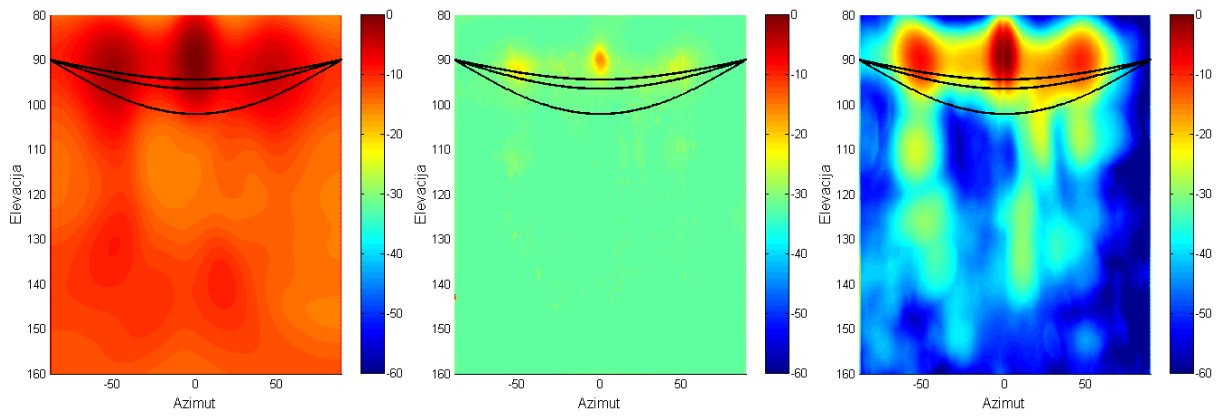
Slika 10.84 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



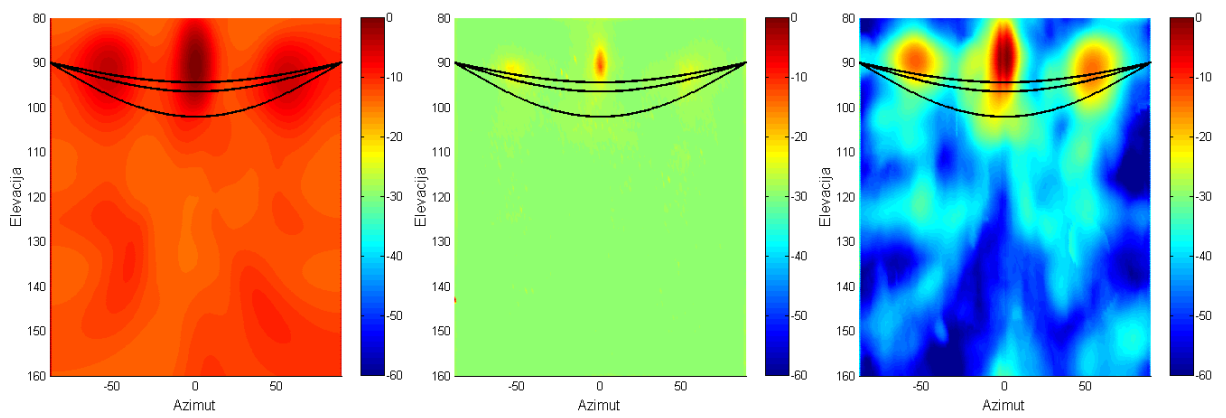
Slika 10.85 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



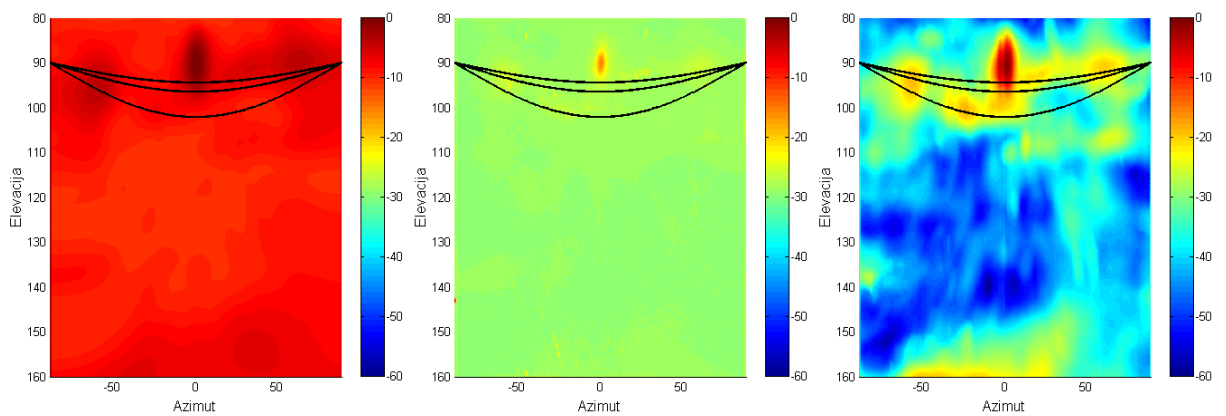
Slika 10.86 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



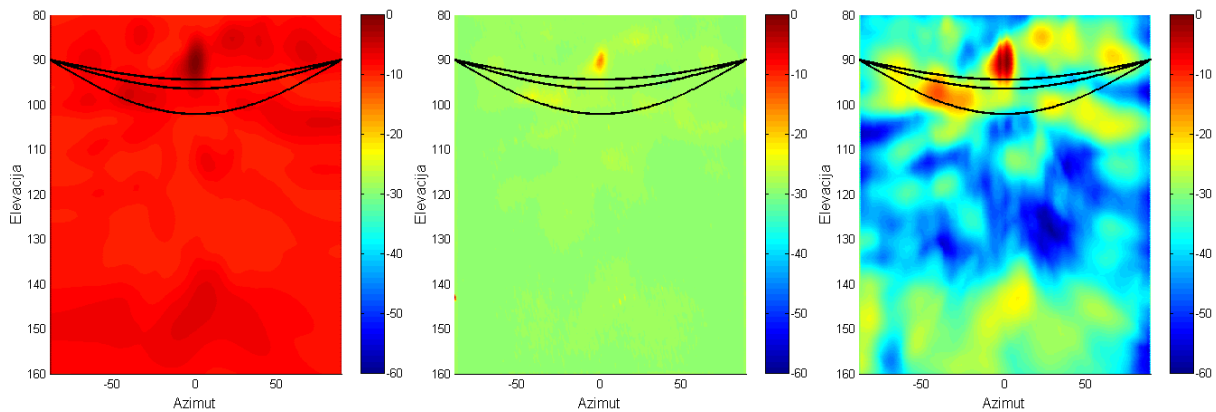
Slika 10.87 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



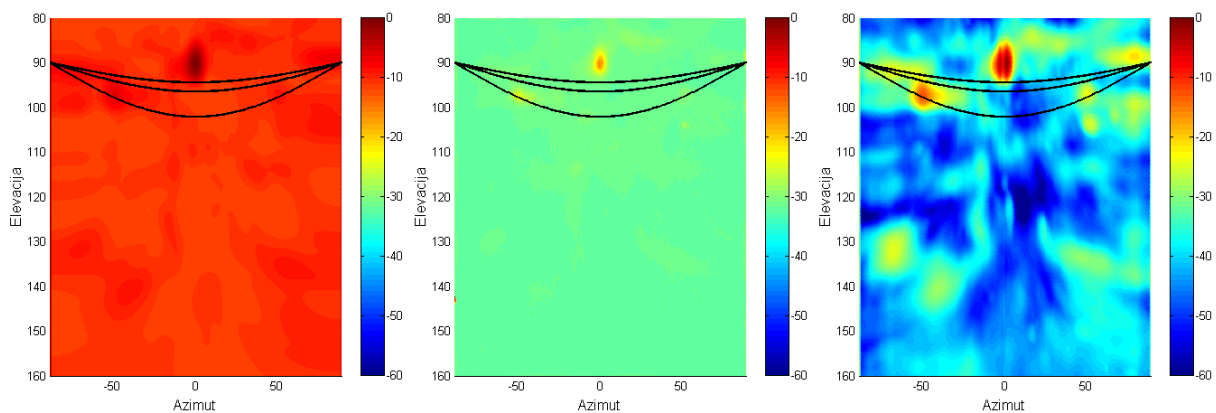
Slika 10.88 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



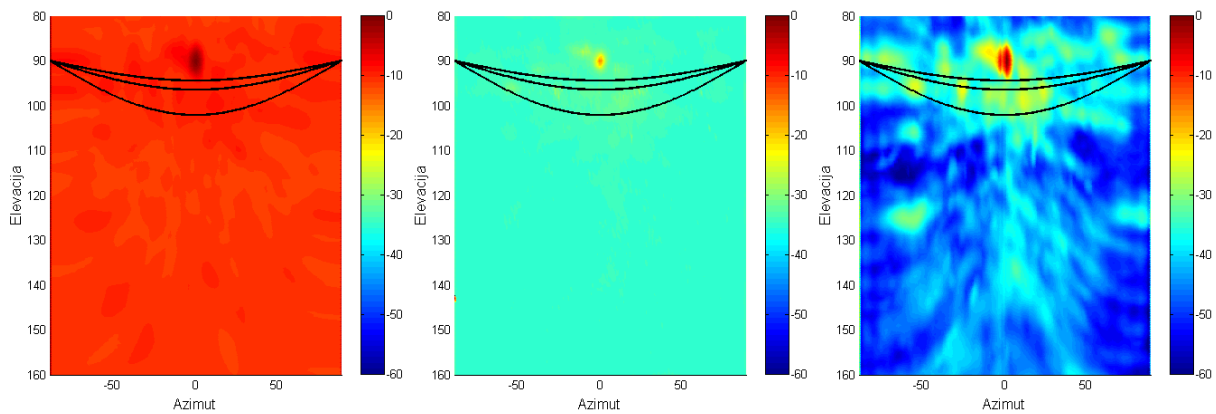
Slika 10.89 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



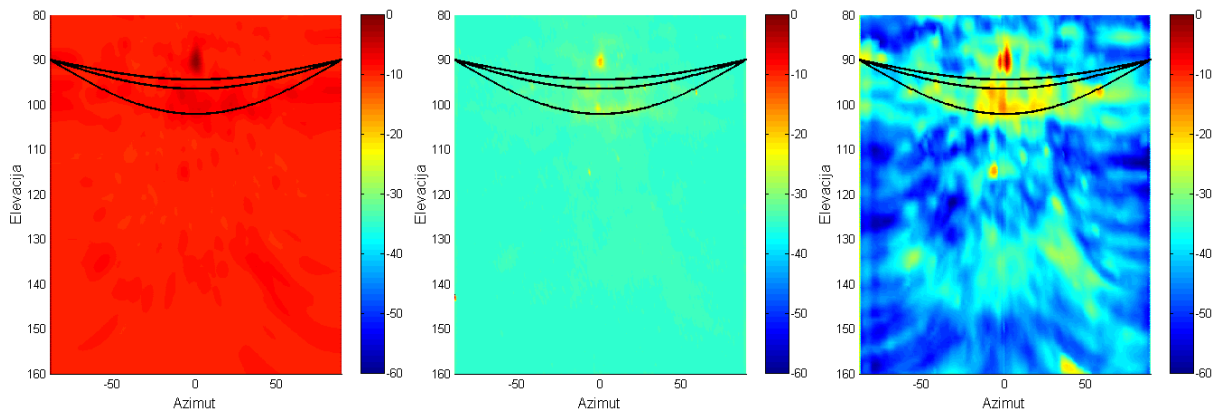
Slika 10.90 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.91 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz

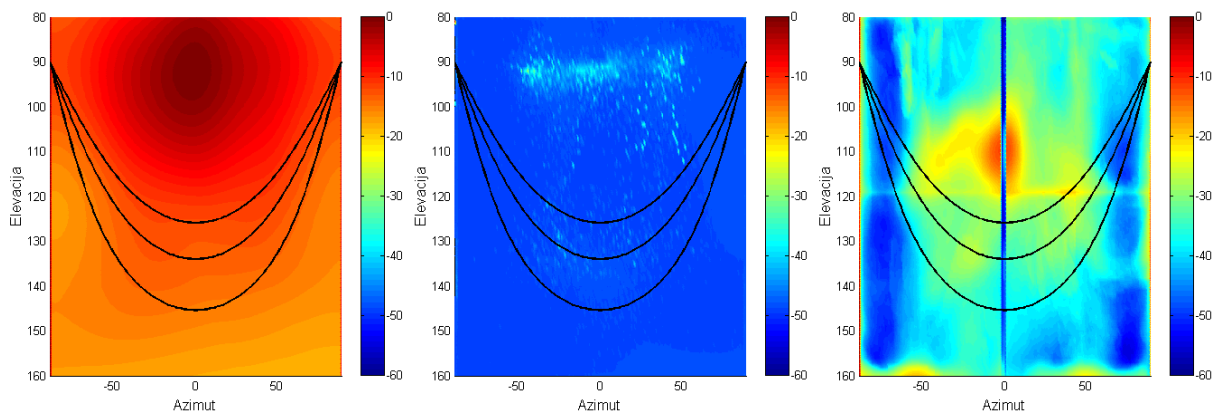


Slika 10.92 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz

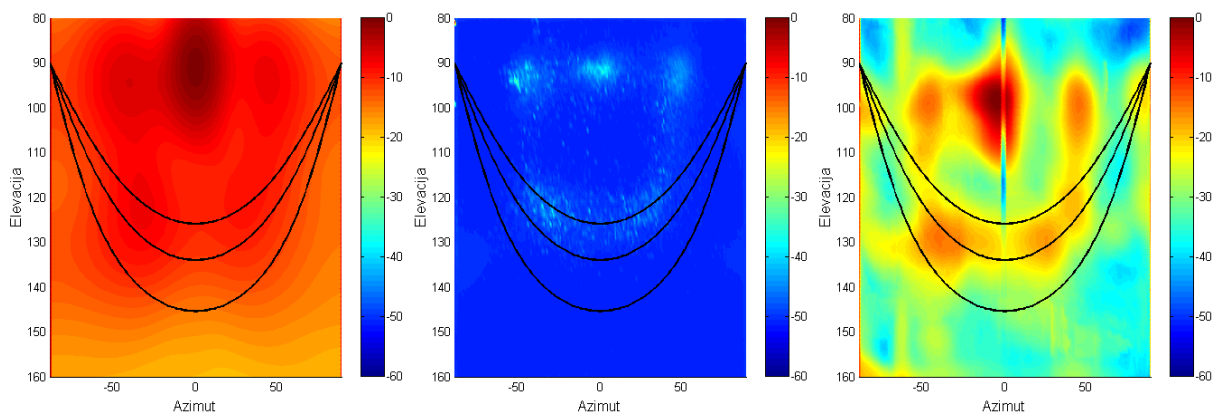


Slika 10.93 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

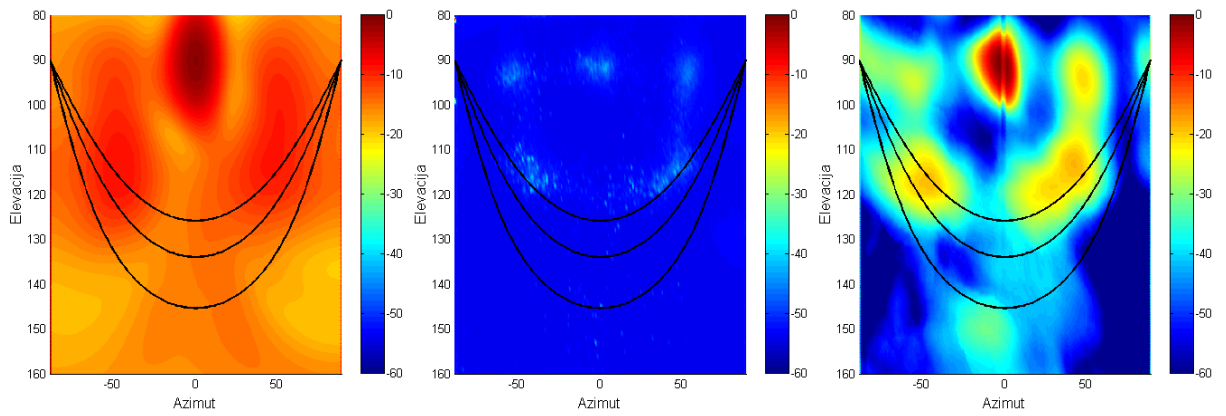
P5.5 Zgrada Molerova (Molerova 70)



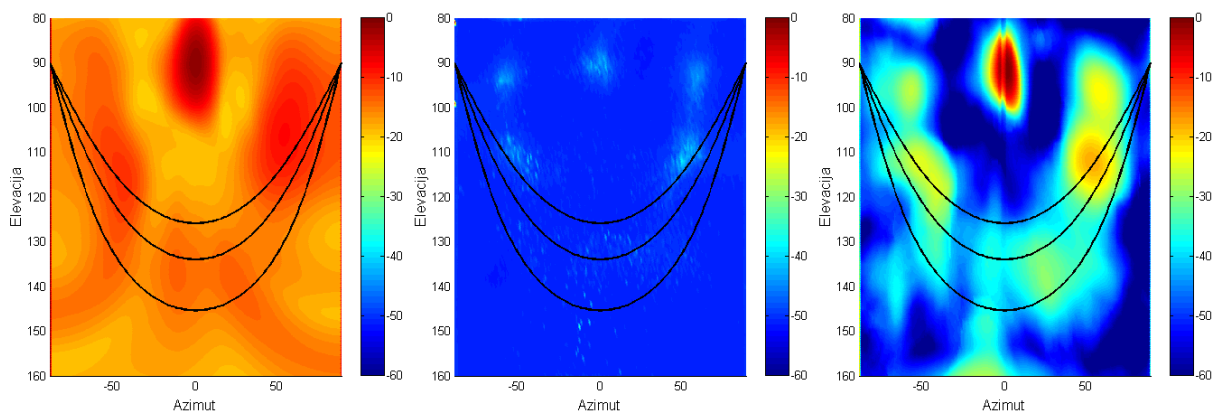
Slika 10.94 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



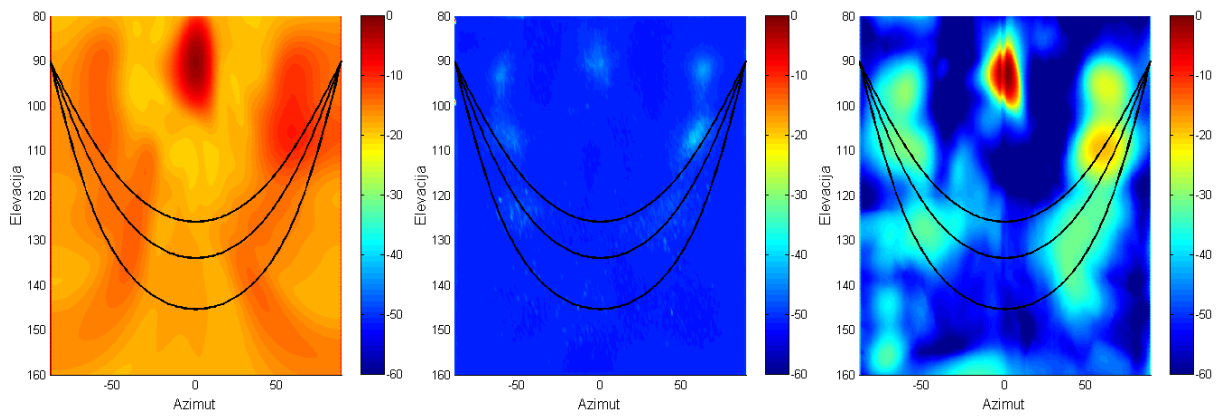
Slika 10.95 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



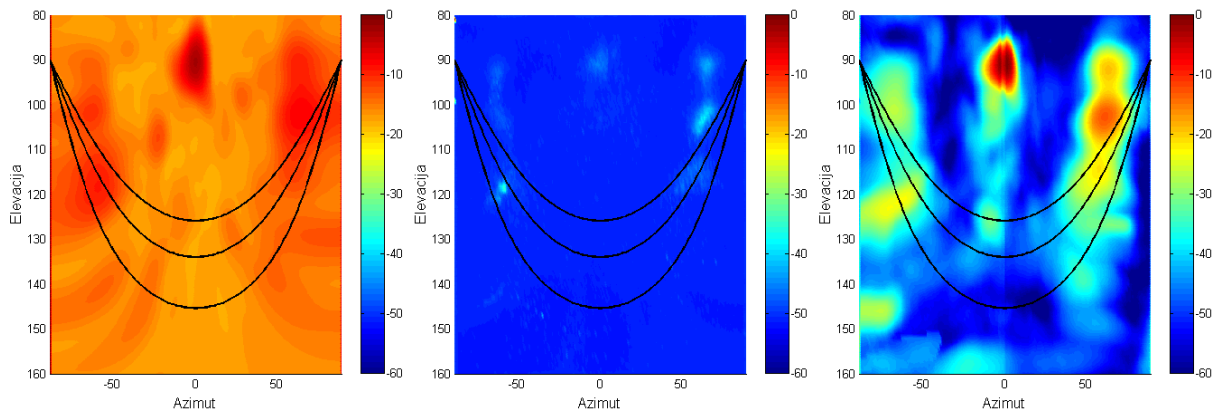
Slika 10.96 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



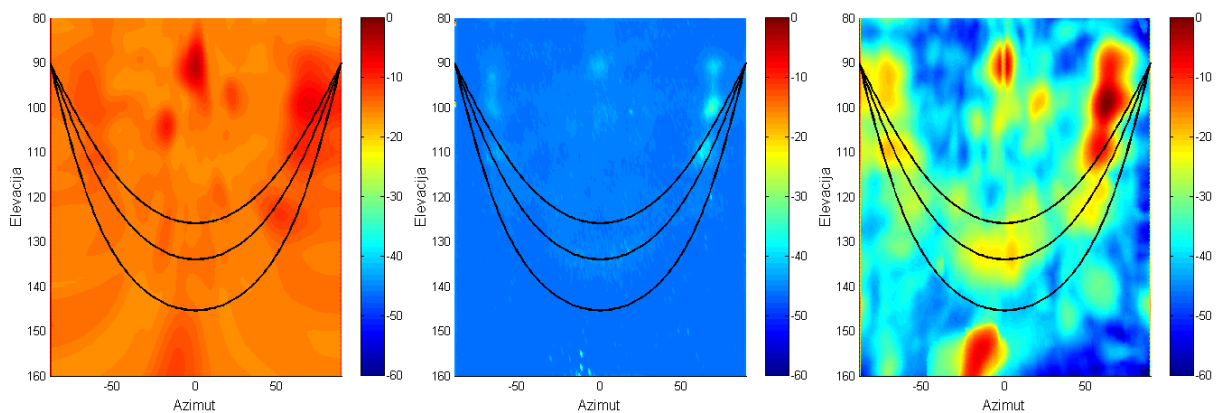
Slika 10.97 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



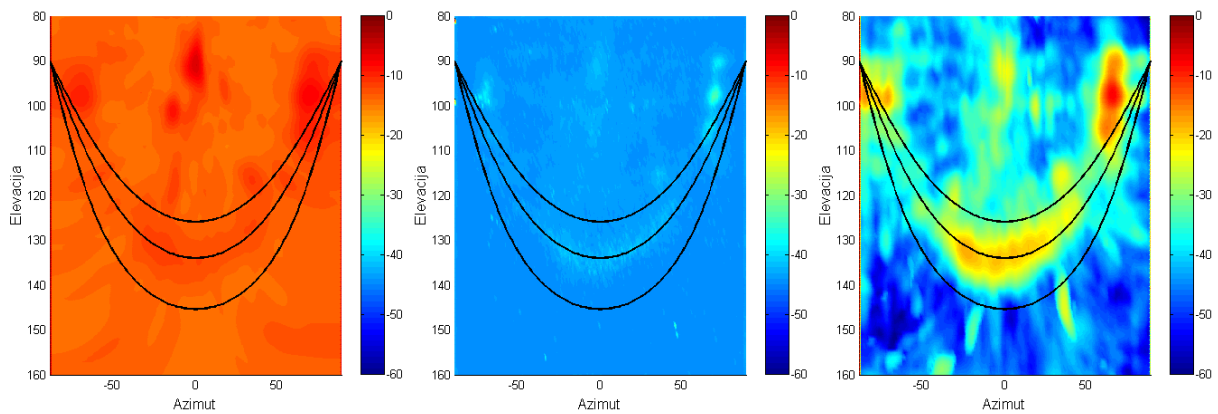
Slika 10.98 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



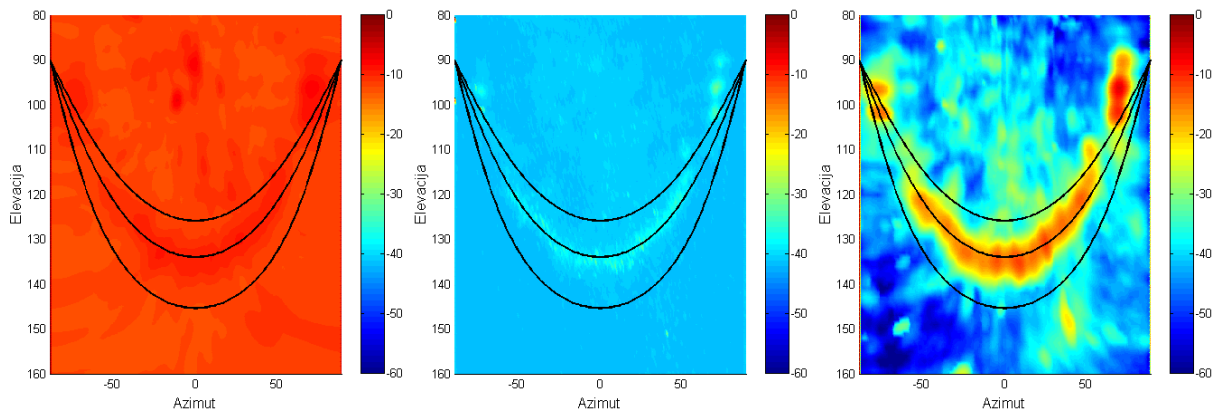
Slika 10.99 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



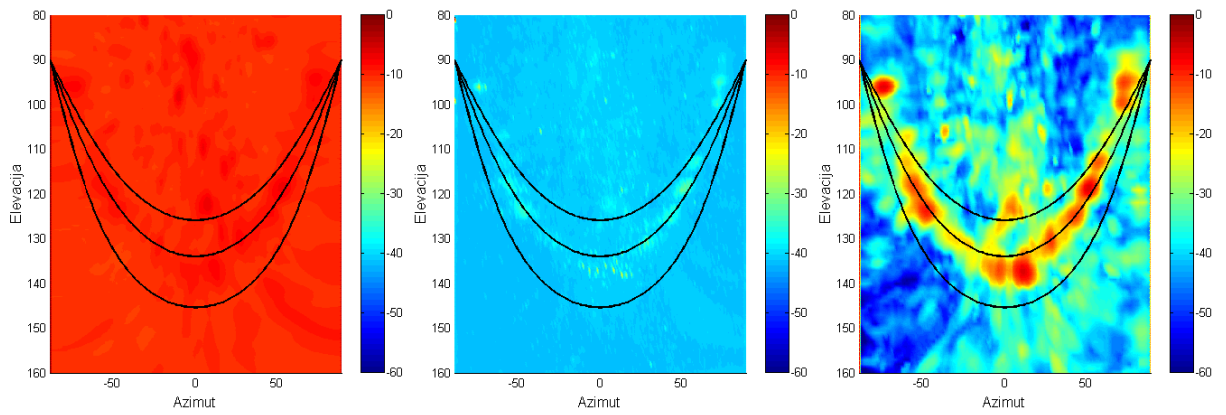
Slika 10.100 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.101 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz

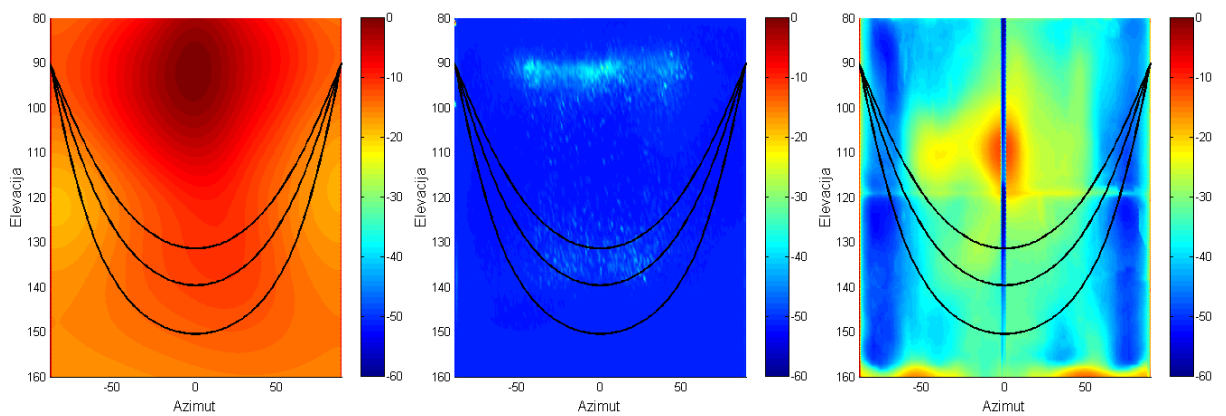


Slika 10.102 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz

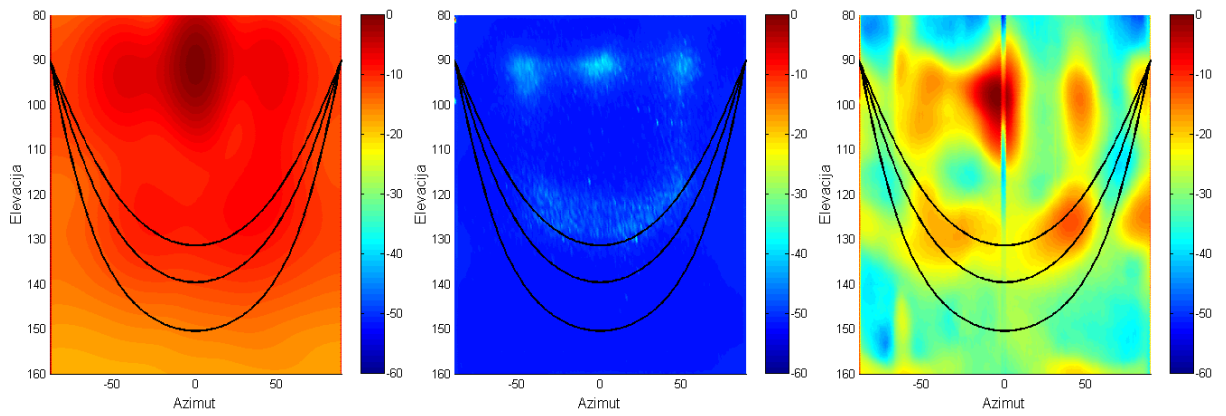


Slika 10.103 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

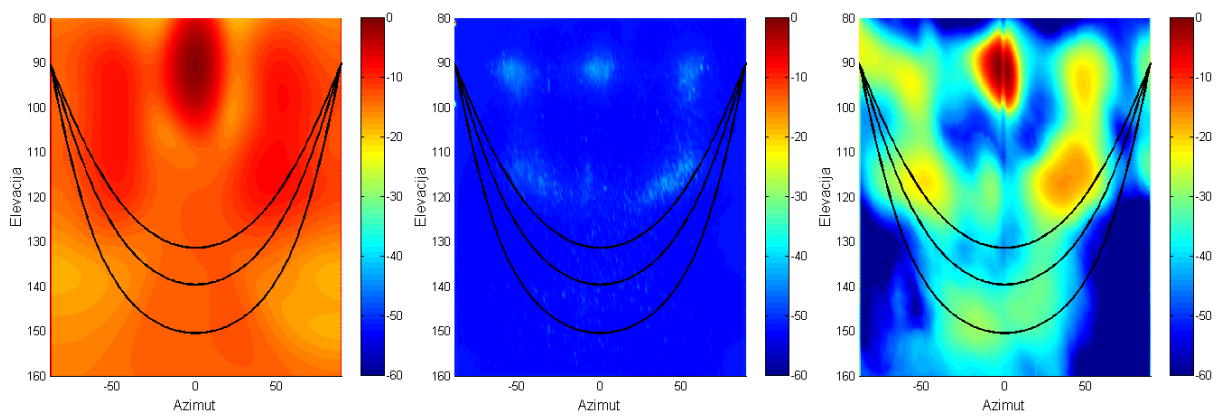
P5.6 Zgrada Molerova (Molerova 70) – visina 2



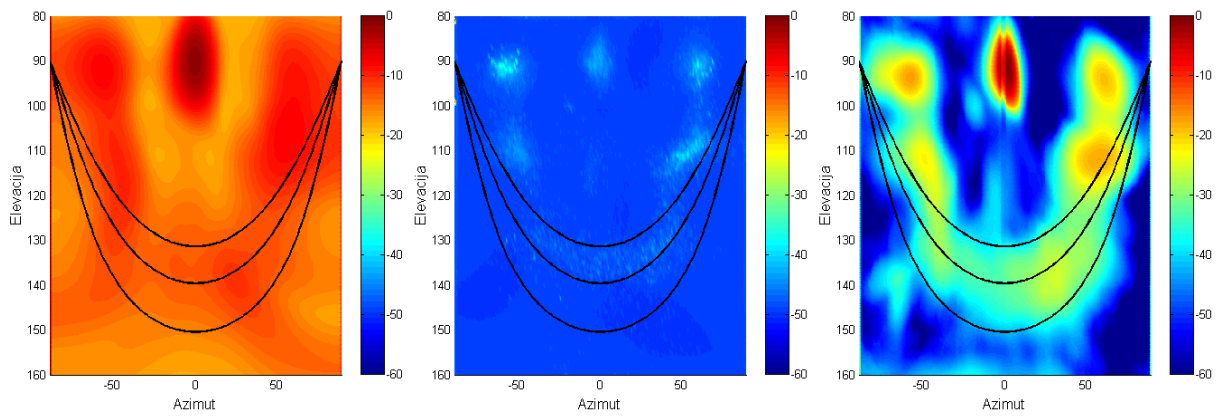
Slika 10.104 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



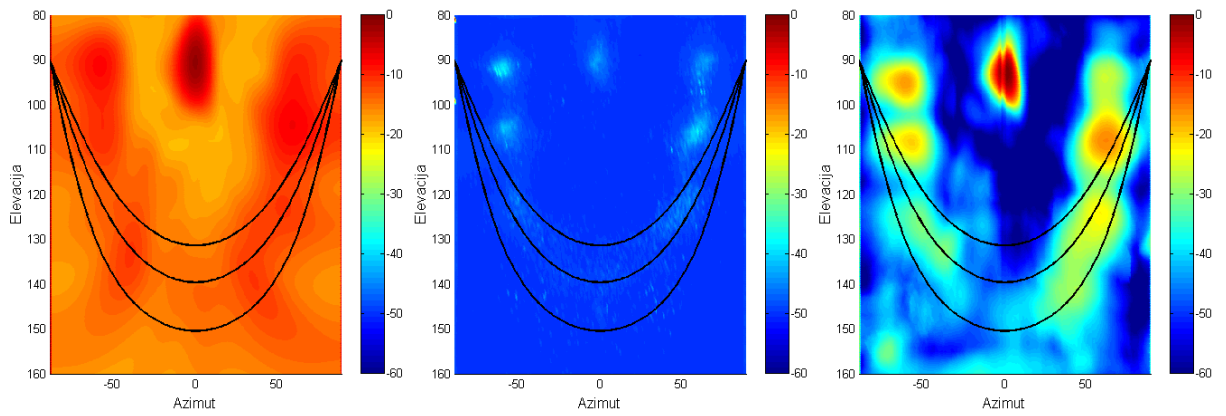
Slika 10.105 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



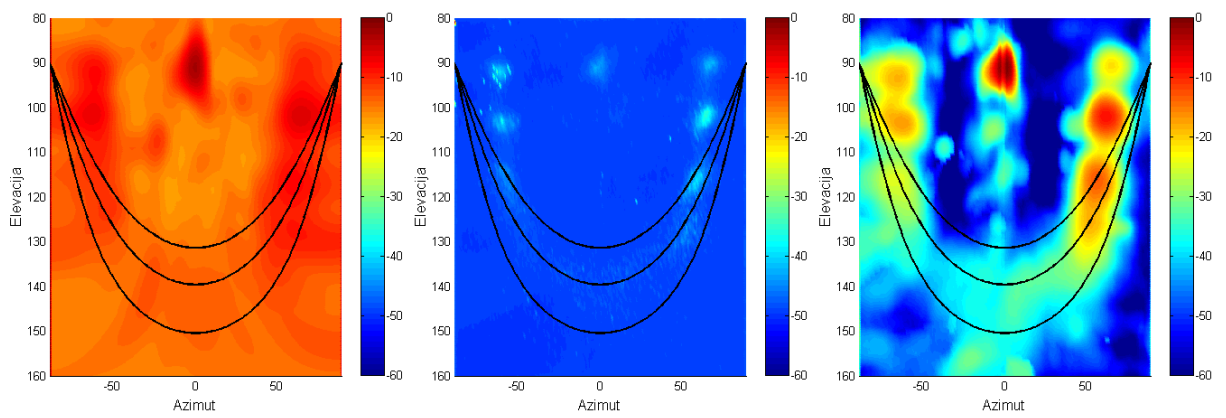
Slika 10.106 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



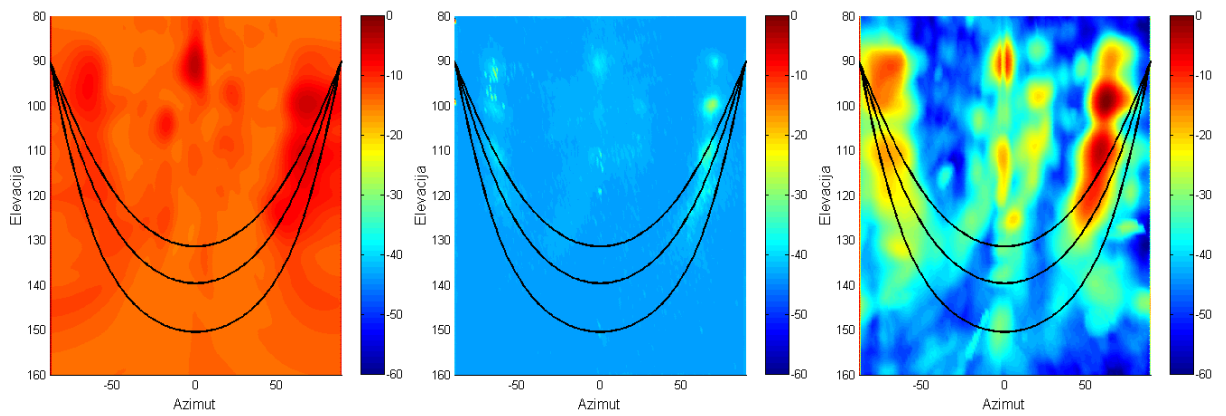
Slika 10.107 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



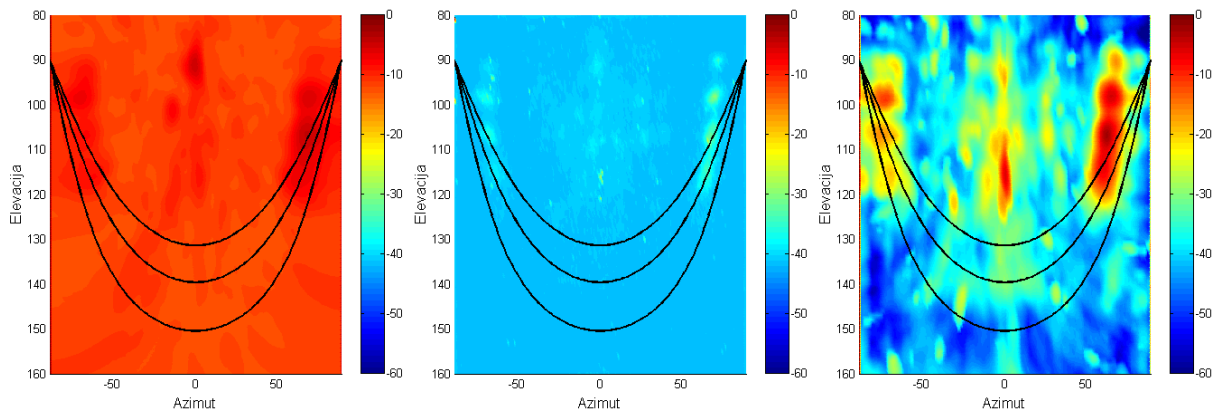
Slika 10.108 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



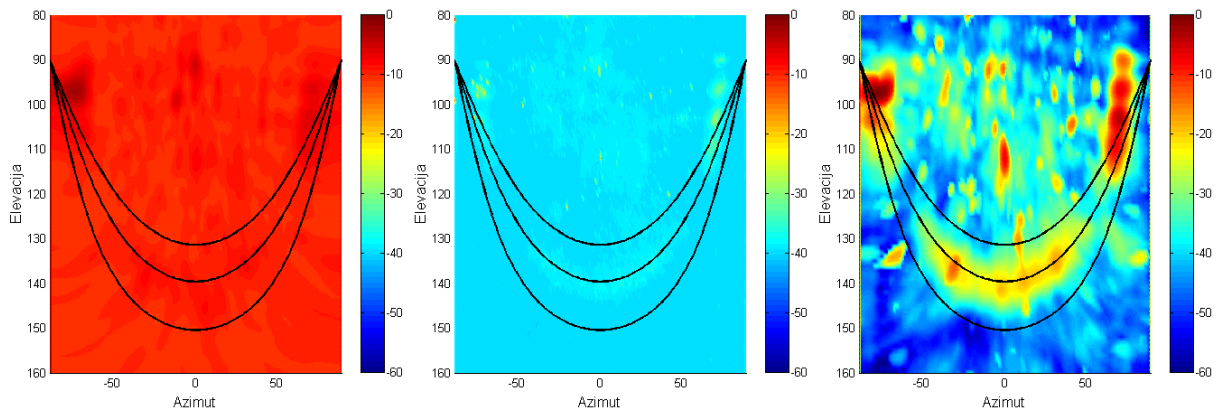
Slika 10.109 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



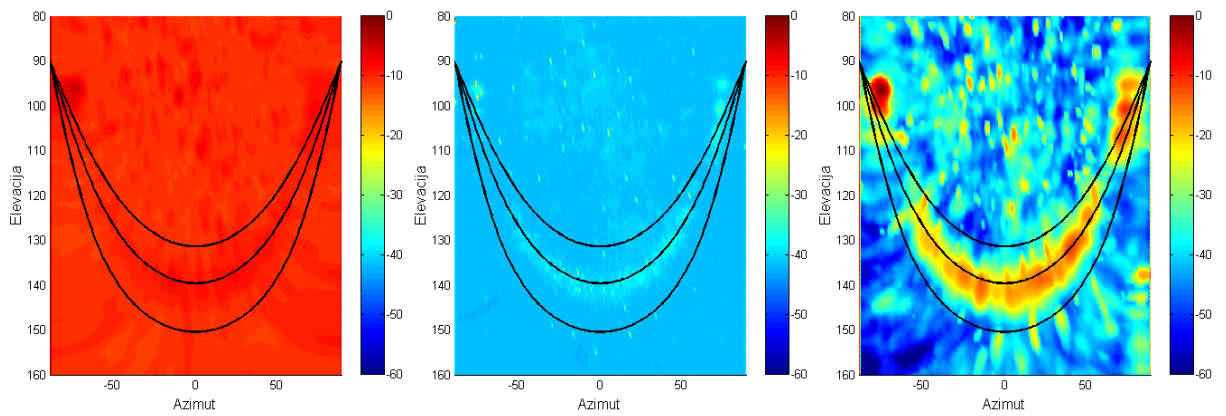
Slika 10.110 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.111 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz

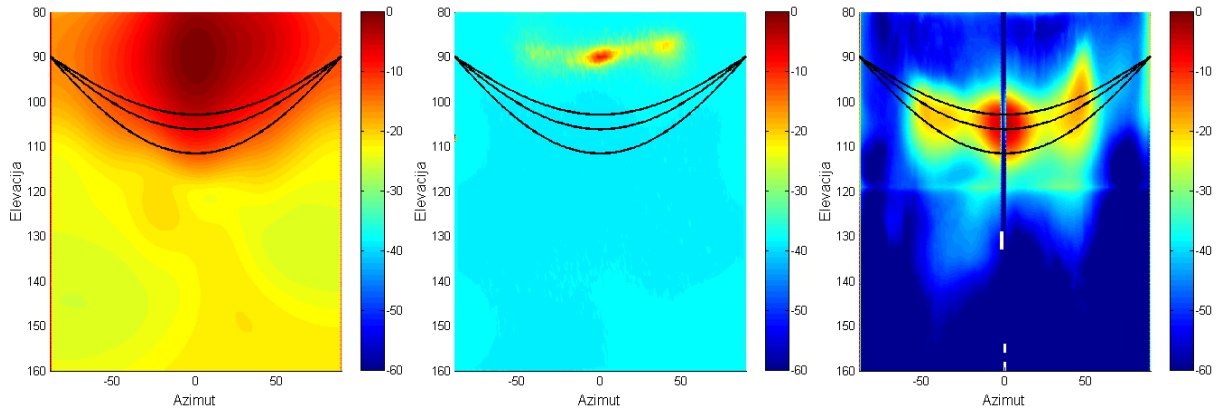


Slika 10.112 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz

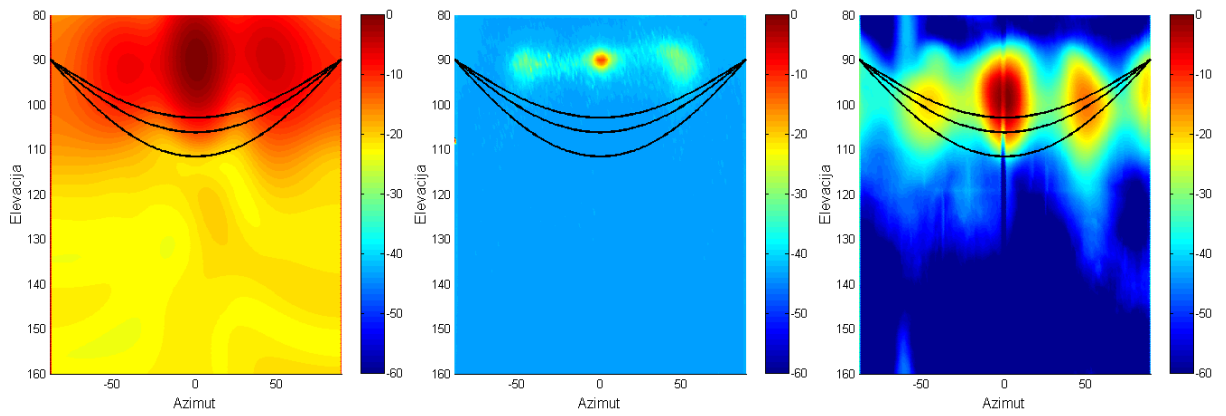


Slika 10.113 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

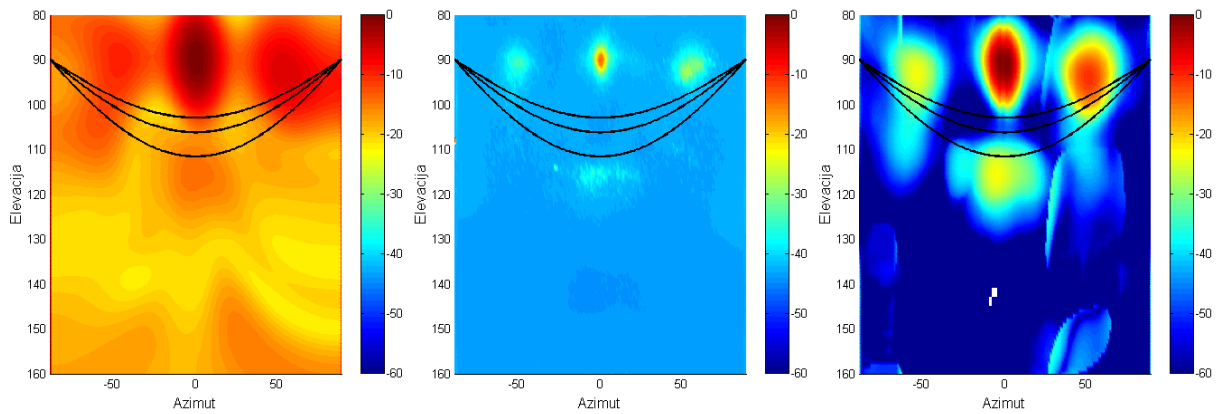
P5.7 Zgrada Zavoda za fiziku (Kraljice Marije 16)



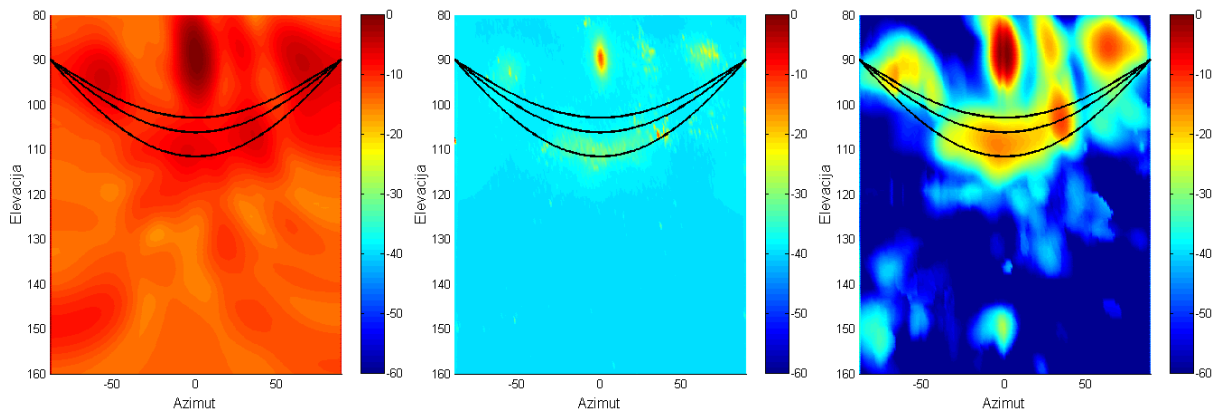
Slika 10.114 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



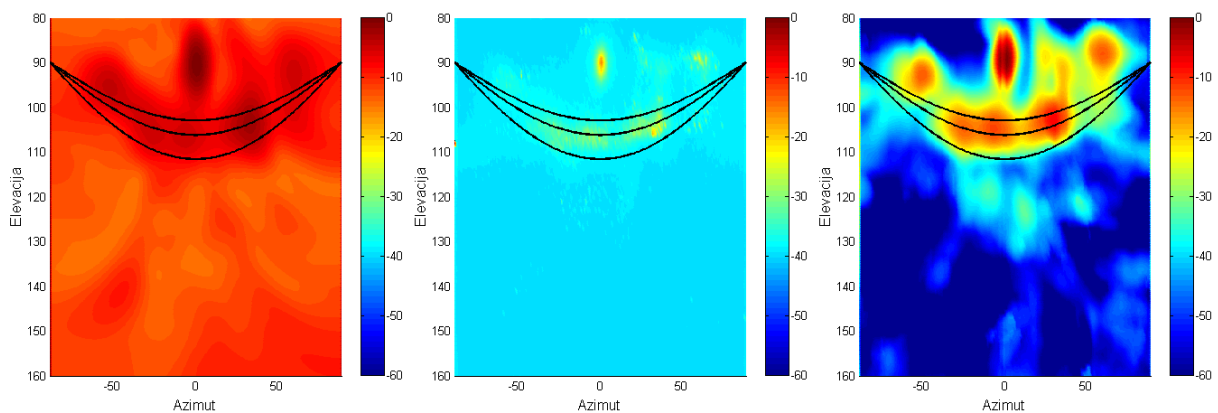
Slika 10.115 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



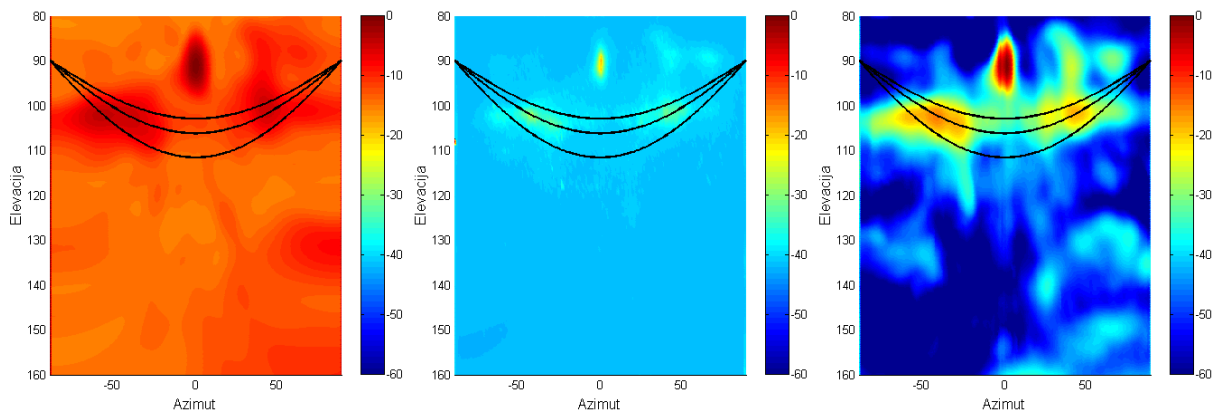
Slika 10.116 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



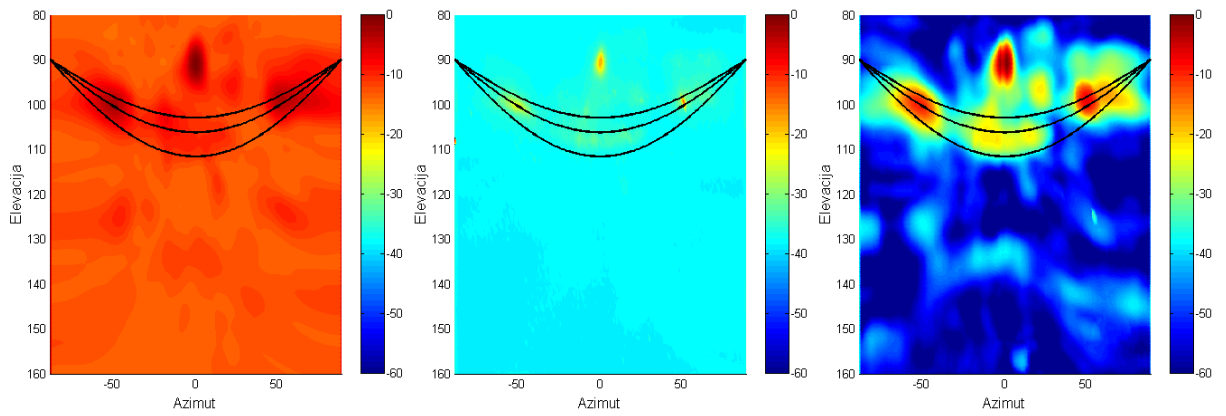
Slika 10.117 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



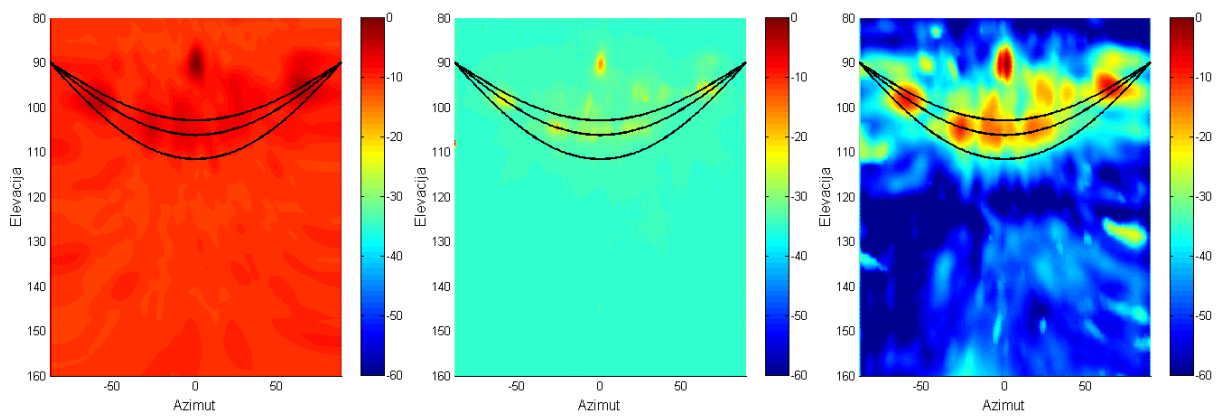
Slika 10.118 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



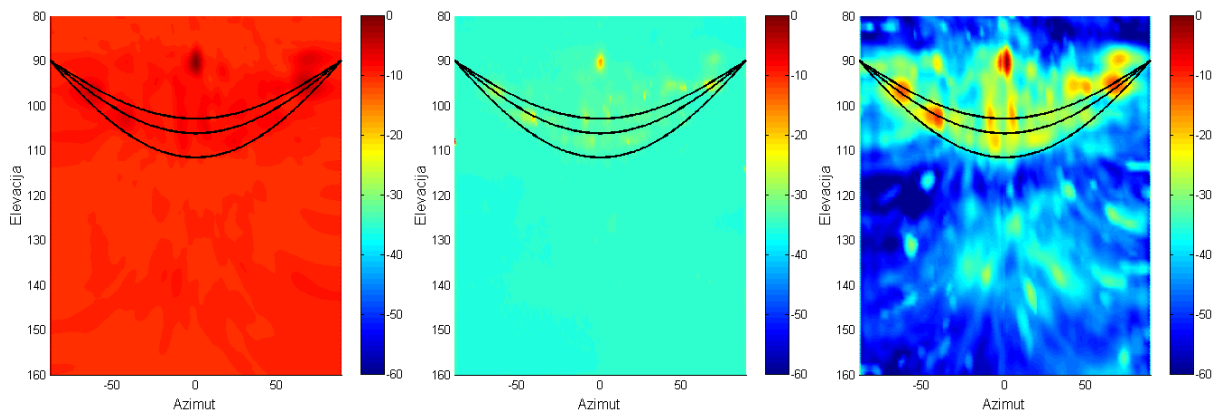
Slika 10.119 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



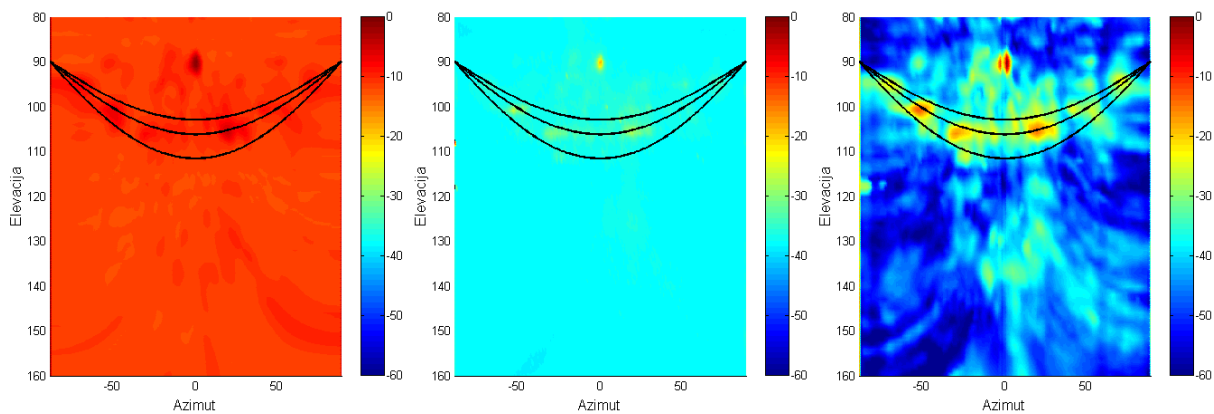
Slika 10.120 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.121 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz

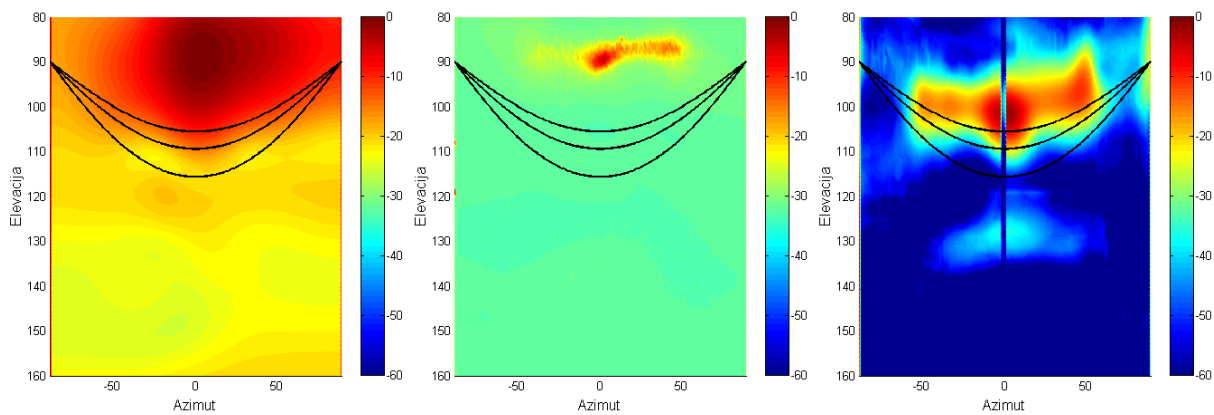


Slika 10.122 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz

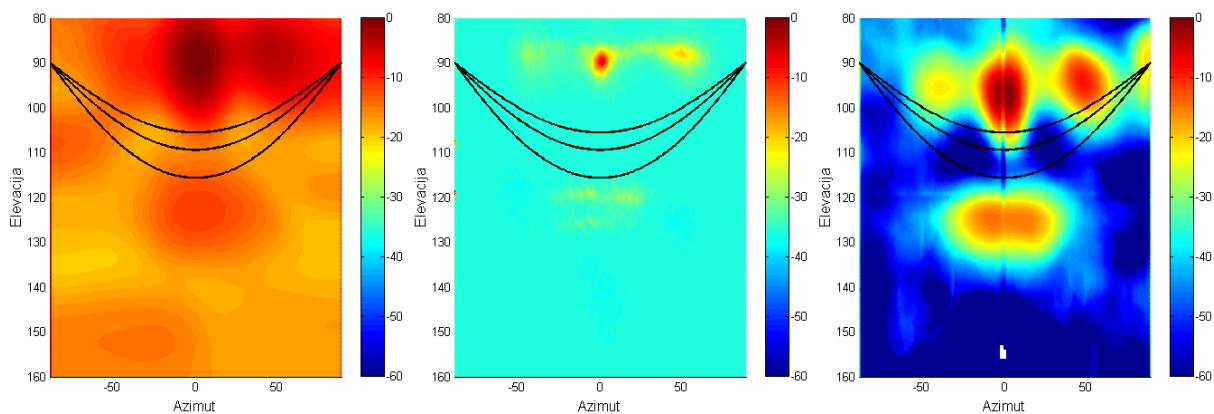


Slika 10.123 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

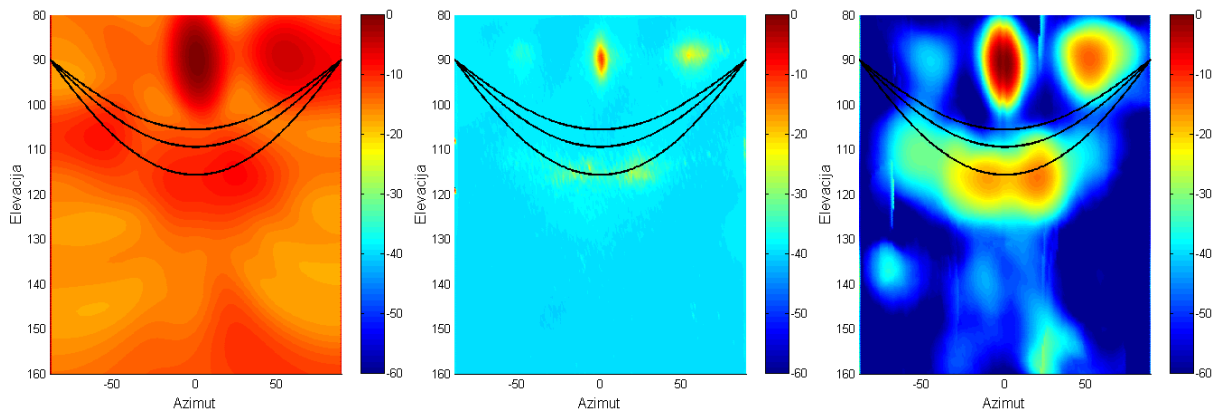
P5.8 Zgrada Zavoda za fiziku (Kraljice Marije 16) – visina 2



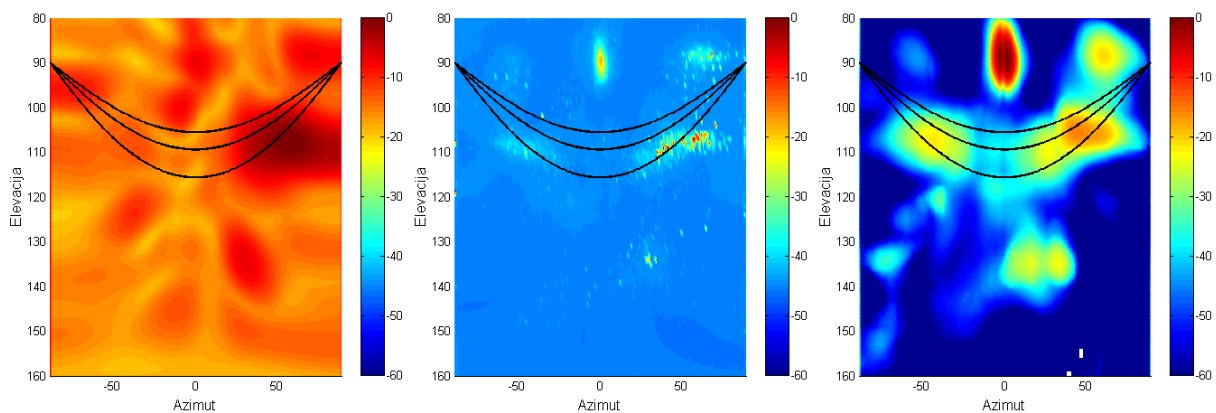
Slika 10.124 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



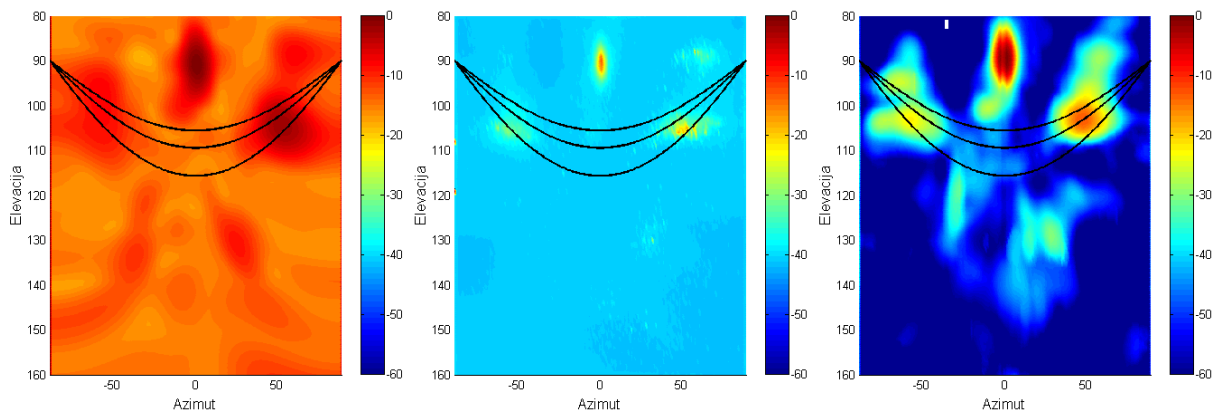
Slika 10.125 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



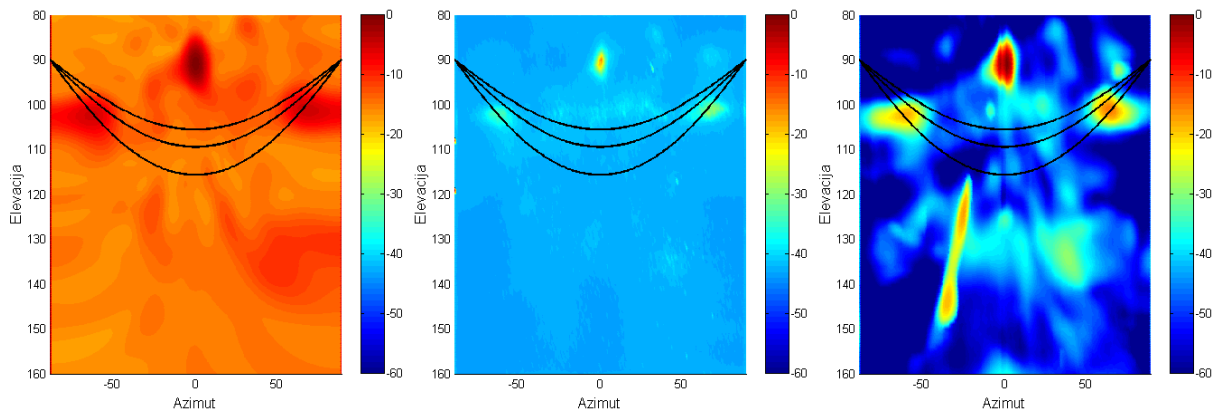
Slika 10.126 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



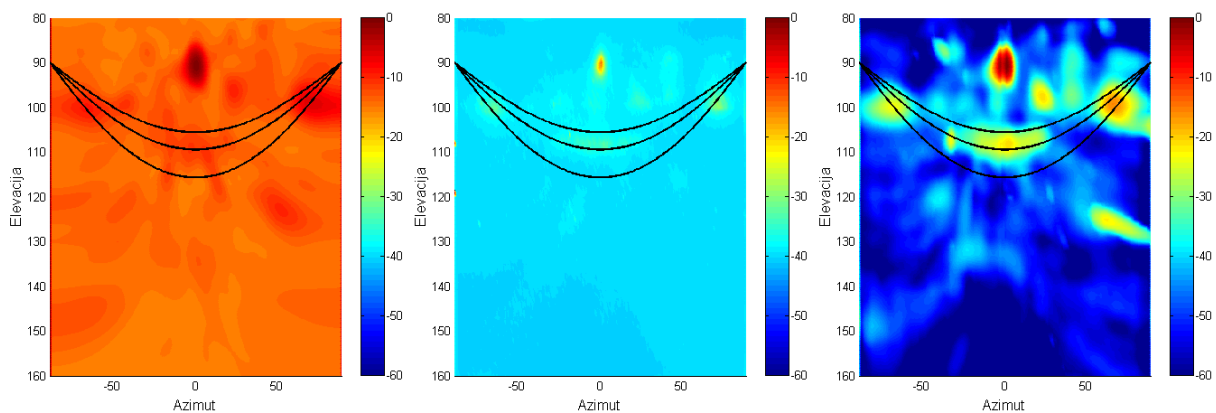
Slika 10.127 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



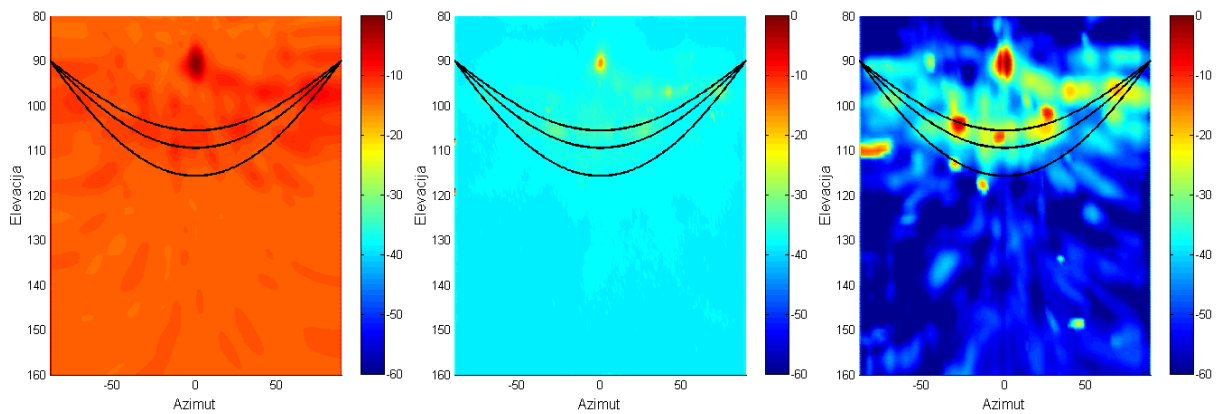
Slika 10.128 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



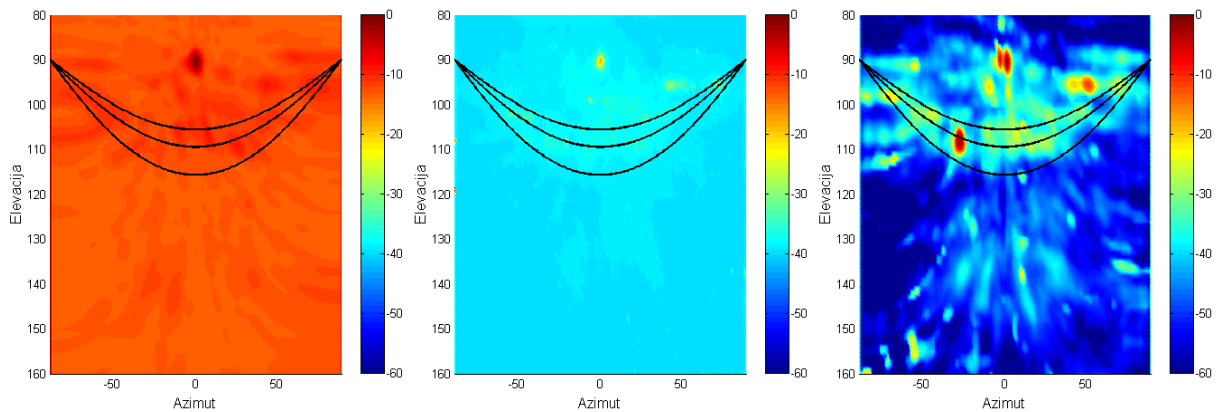
Slika 10.129 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



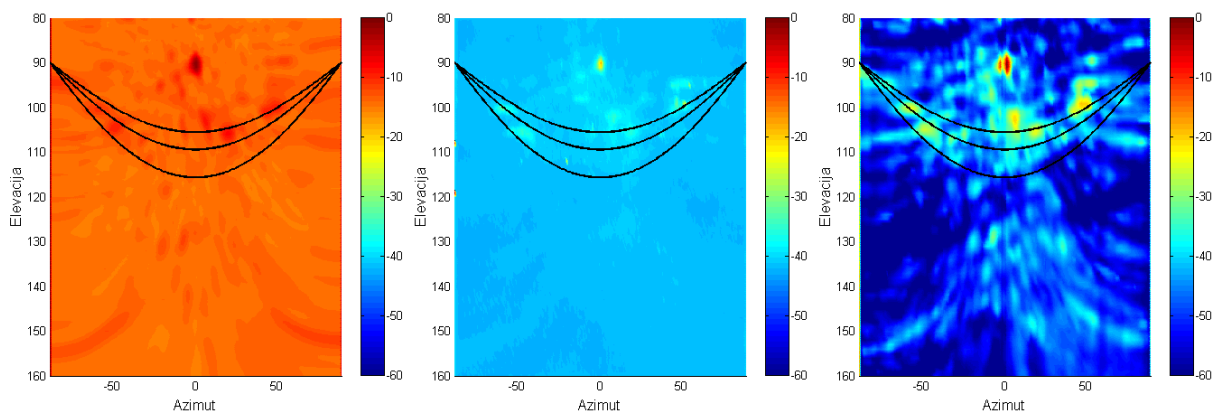
Slika 10.130 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.131 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz

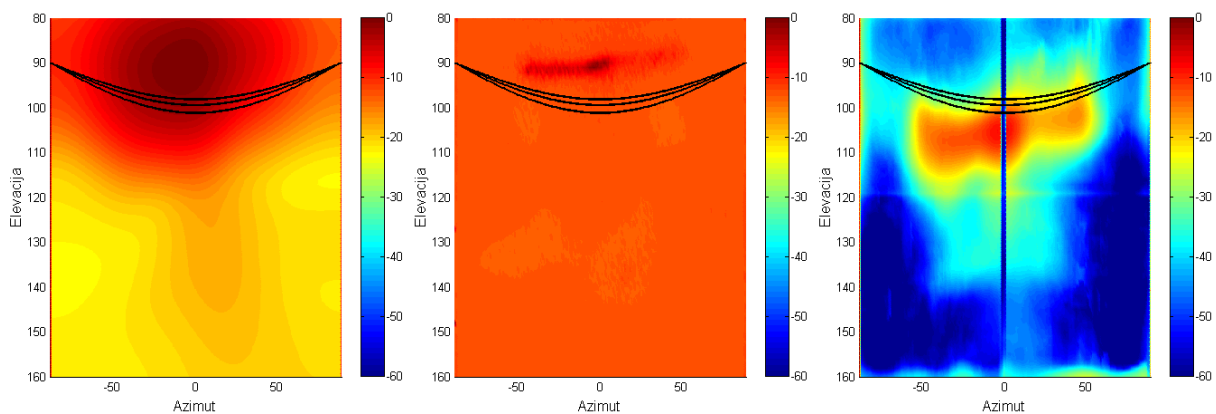


Slika 10.132 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz

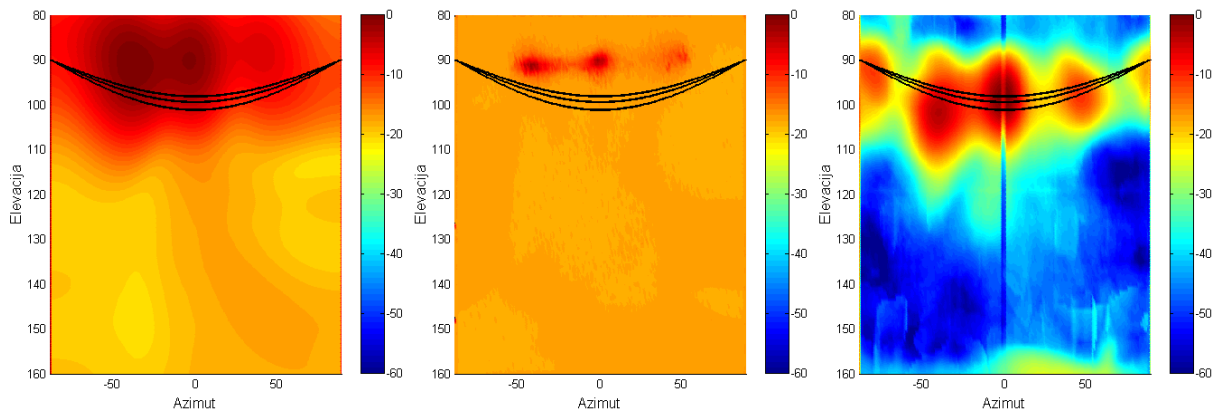


Slika 10.133 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

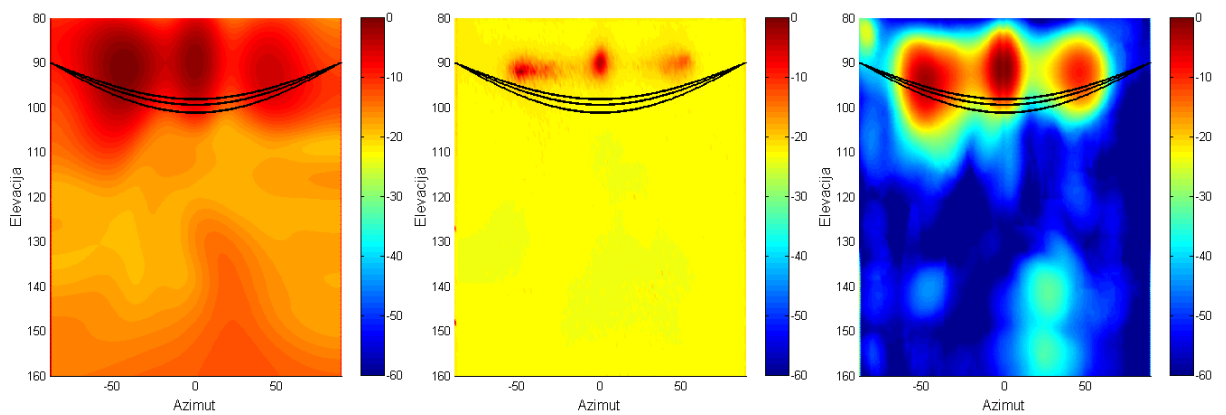
P5.9 Zgrada Zavoda za fiziku (Ruzveltova 1a)



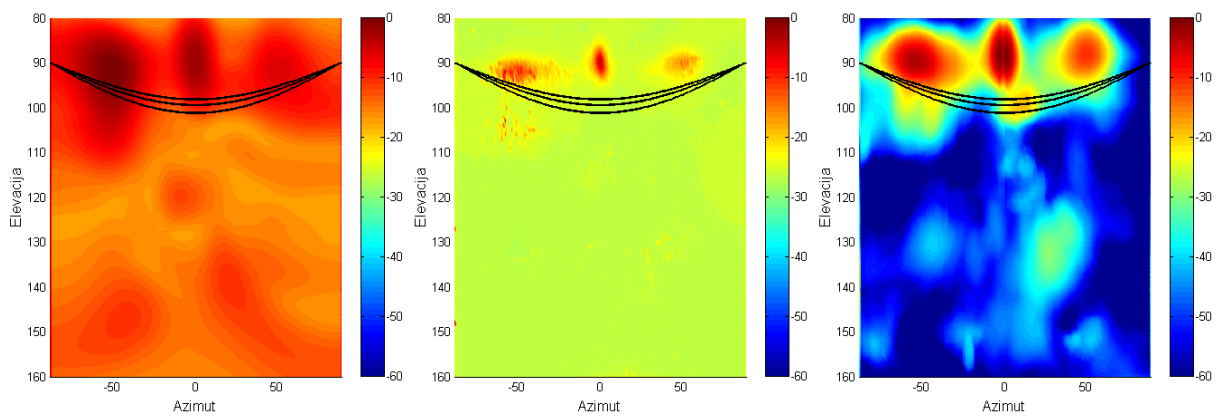
Slika 10.134 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



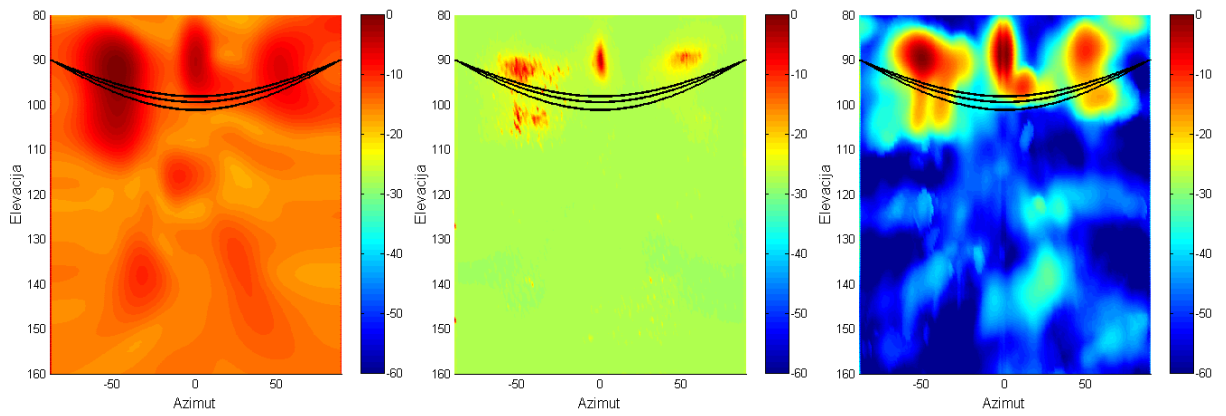
Slika 10.135 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



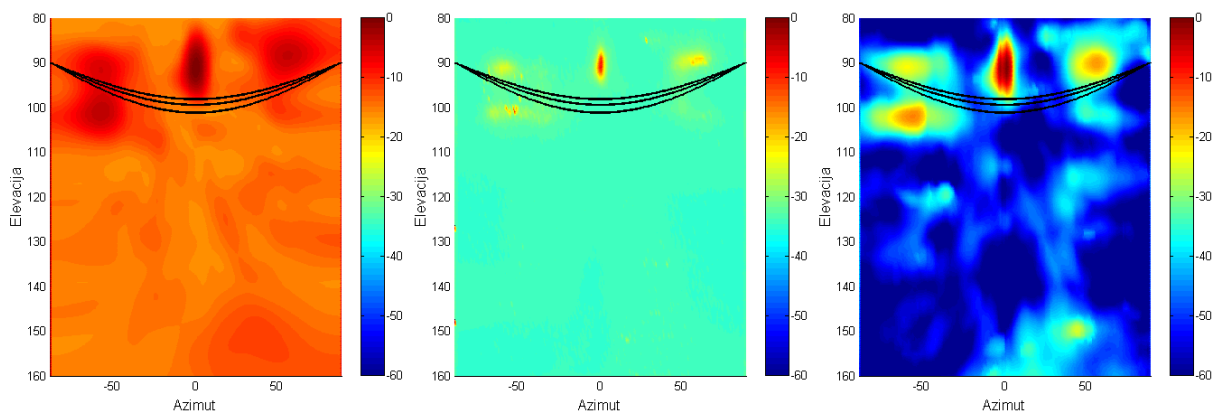
Slika 10.136 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



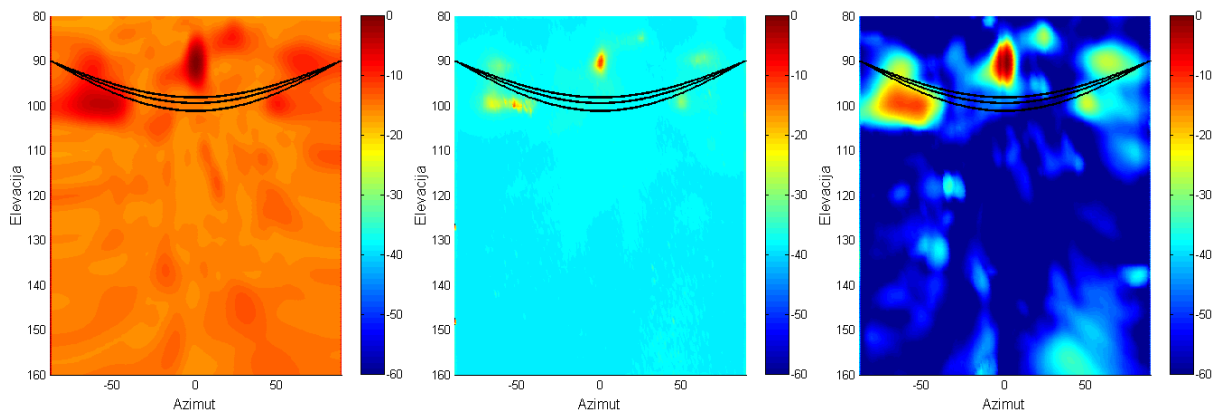
Slika 10.137 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



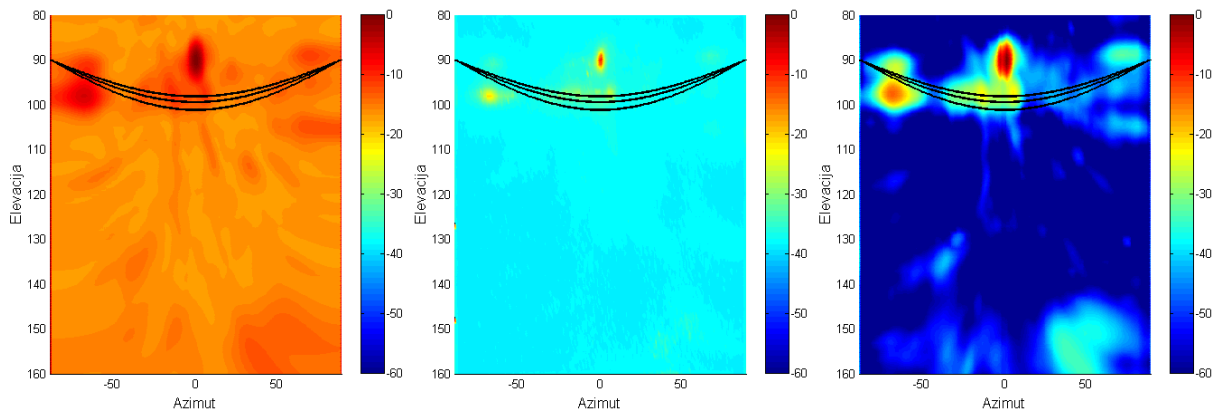
Slika 10.138 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



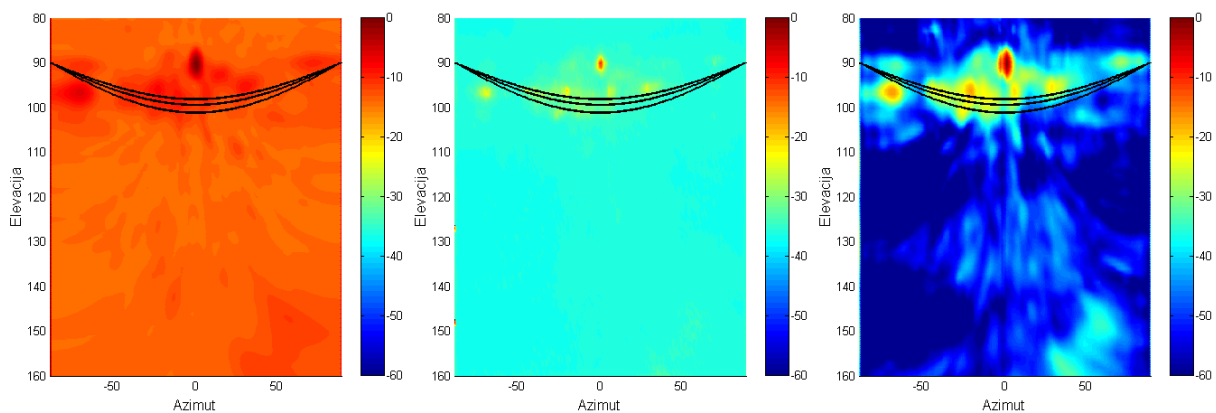
Slika 10.139 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



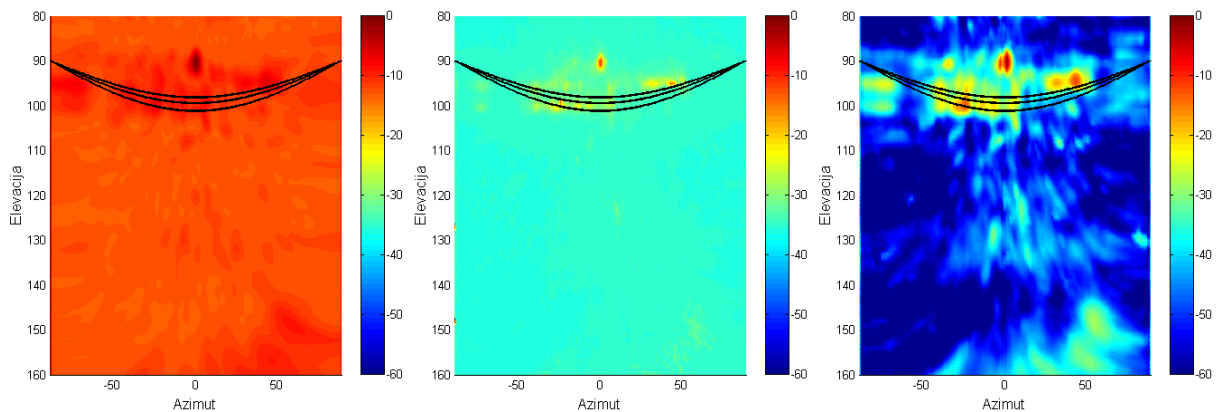
Slika 10.140 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.141 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz

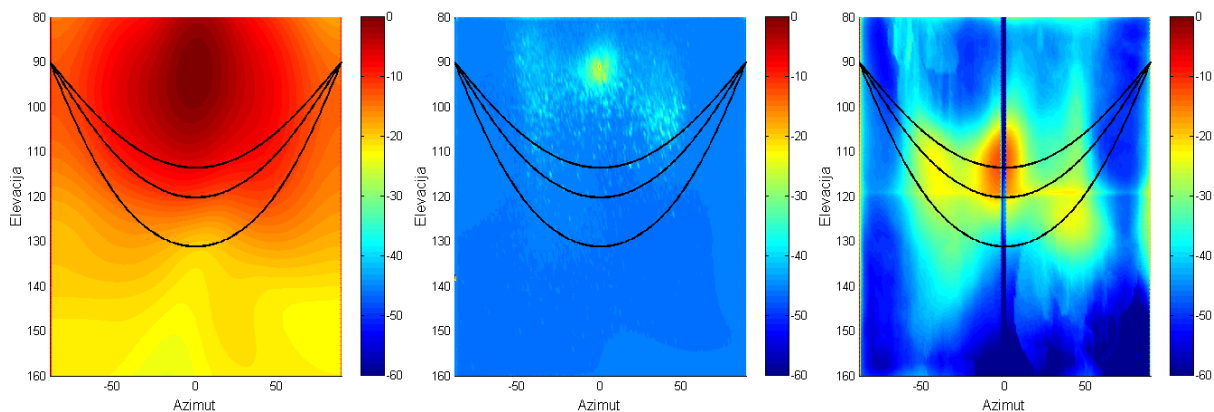


Slika 10.142 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz

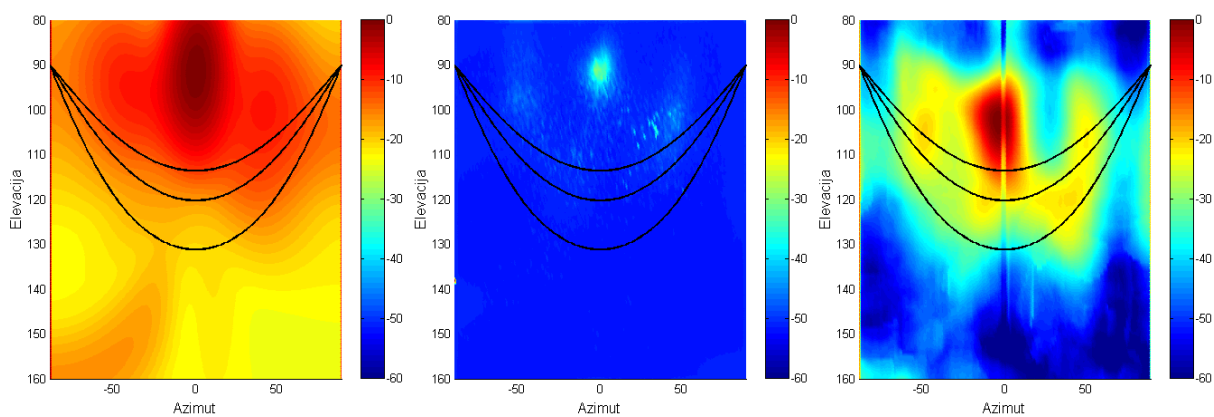


Slika 10.143 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

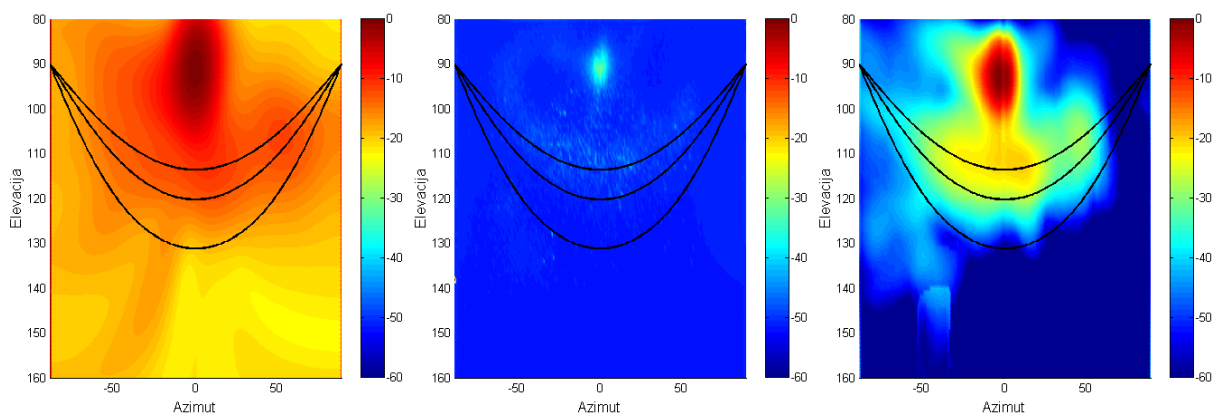
P5.10 Zgrada Ilije Garašanina 19



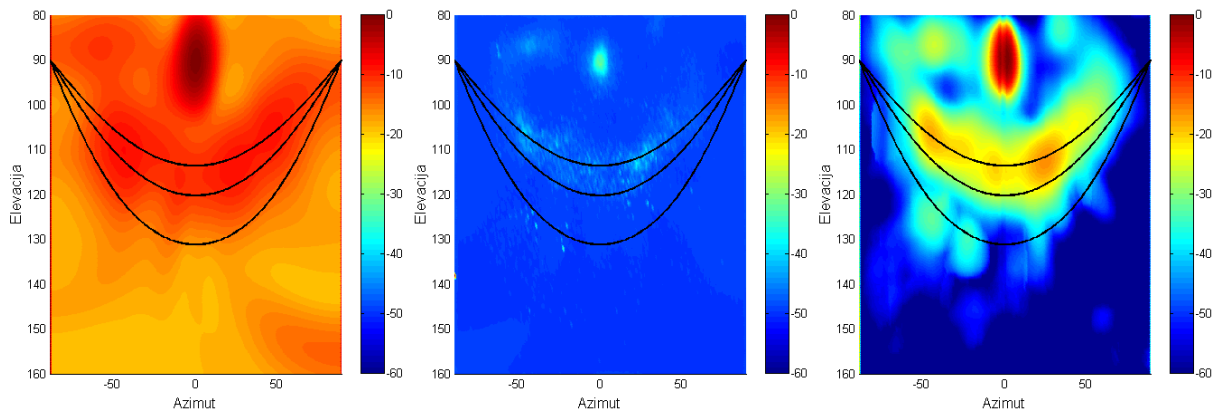
Slika 10.144 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



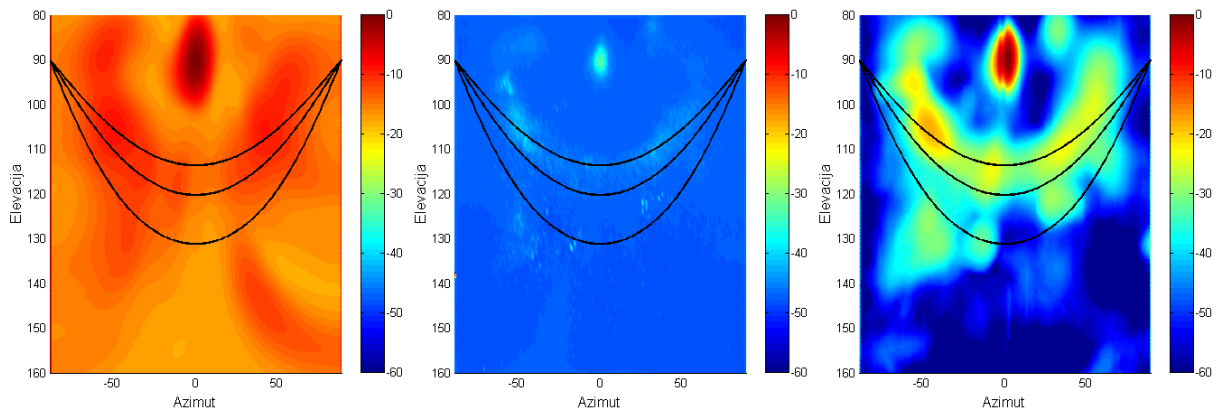
Slika 10.145 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



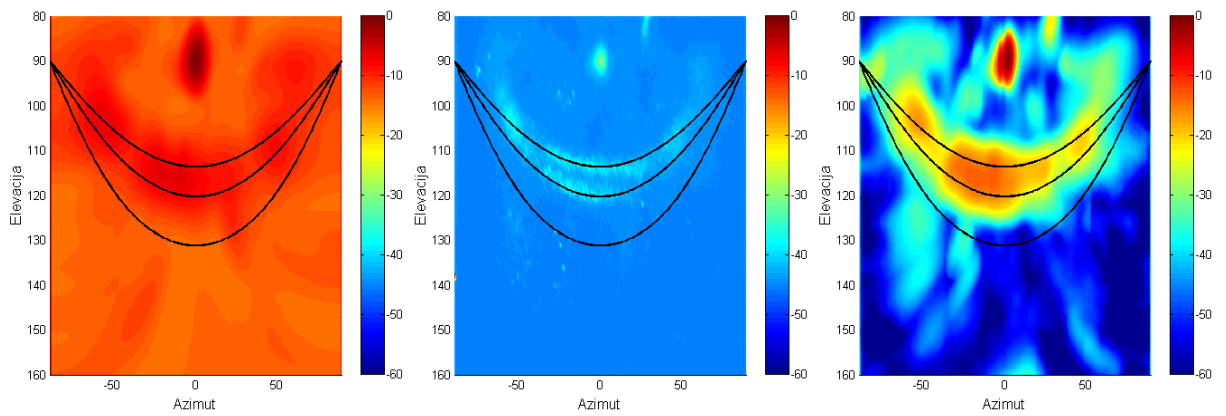
Slika 10.146 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



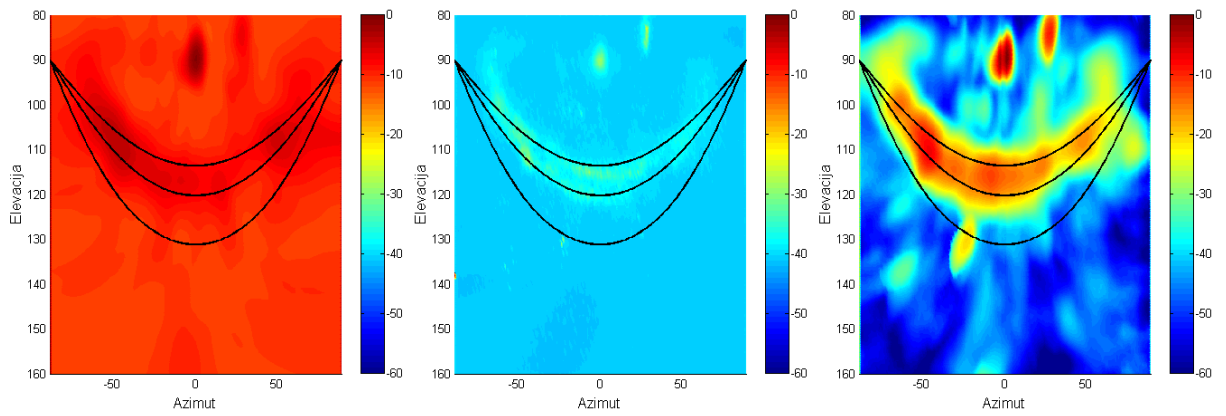
Slika 10.147 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



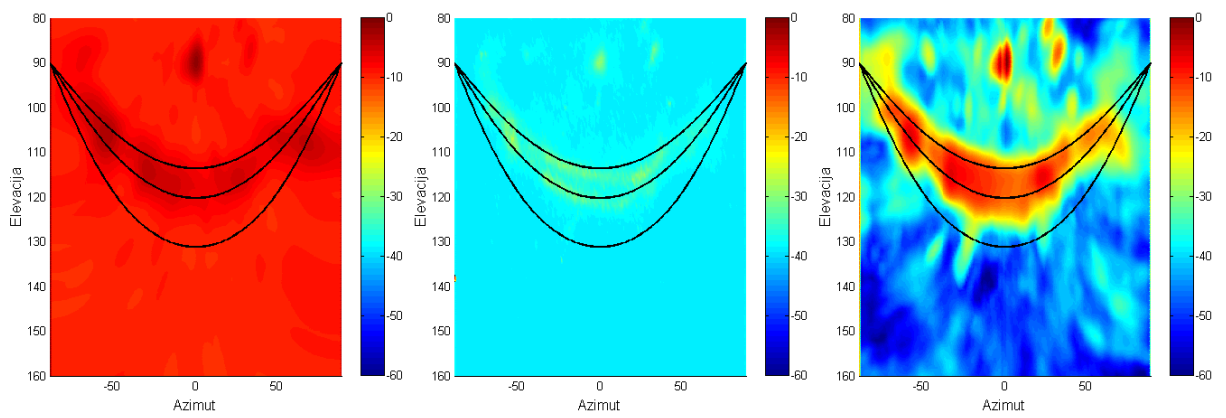
Slika 10.148 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



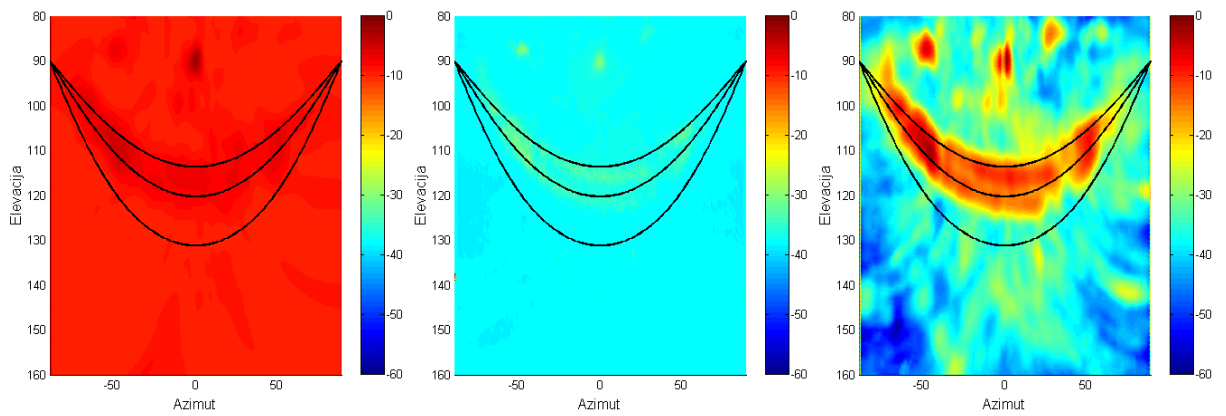
Slika 10.149 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



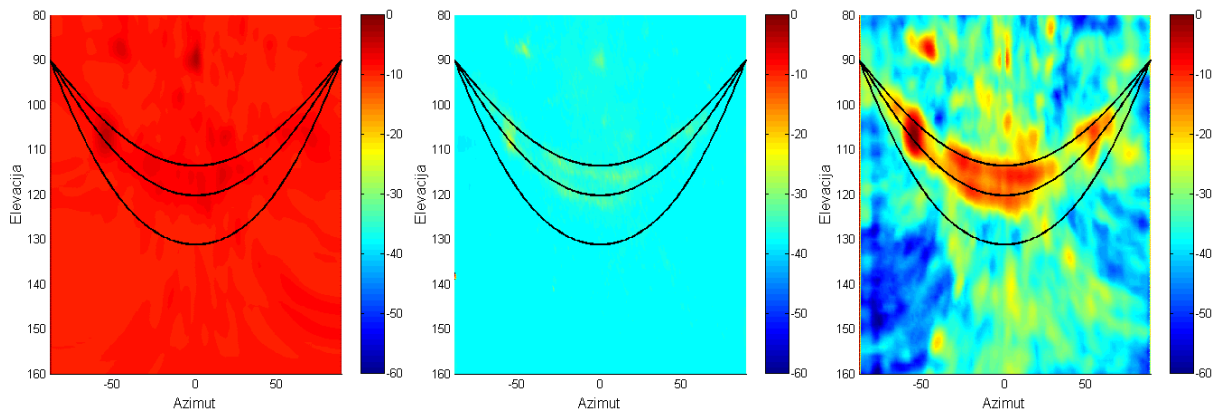
Slika 10.150 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.151 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz

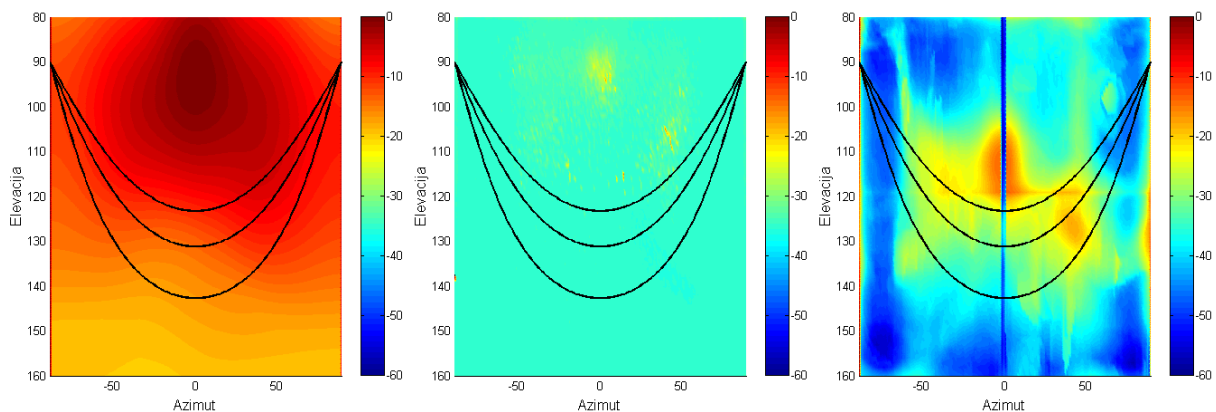


Slika 10.152 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz

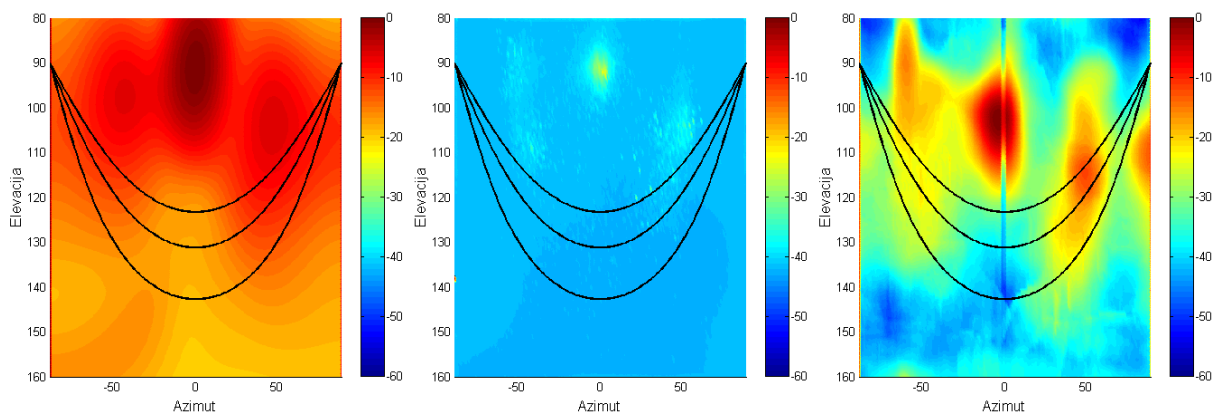


Slika 10.153 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

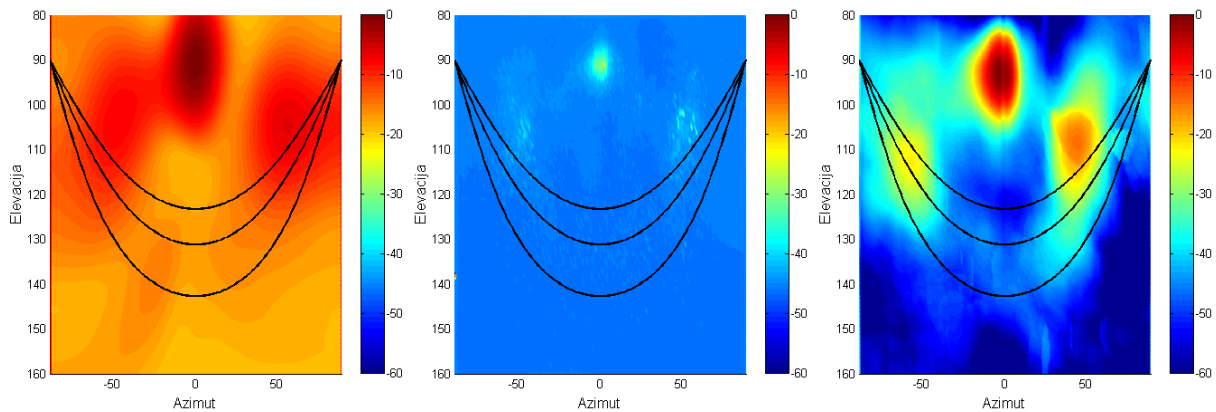
P5.11 Zgrada Ilije Garašanina 19 – visina 2



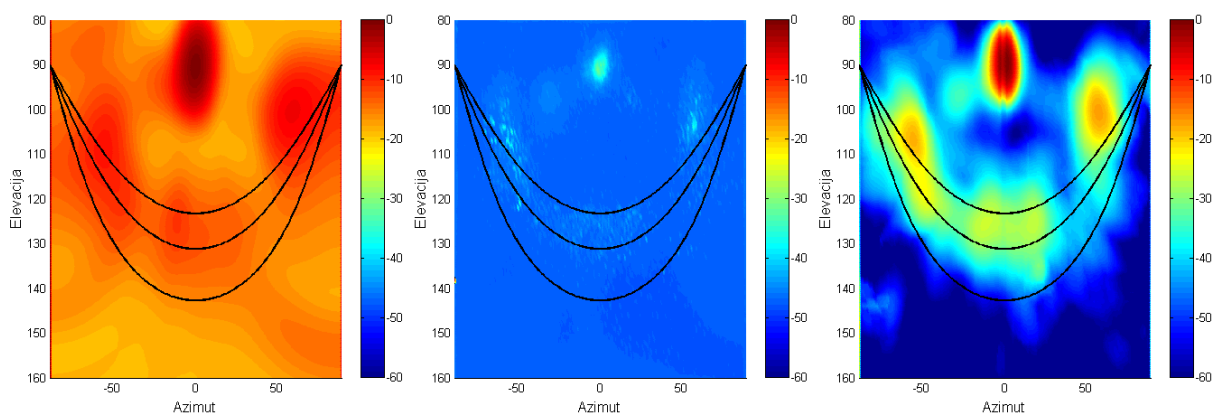
Slika 10.154 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



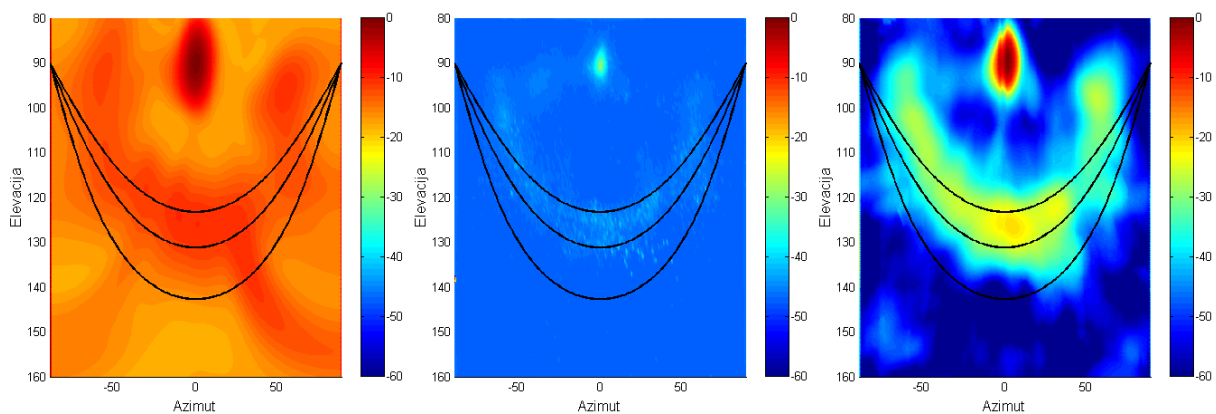
Slika 10.155 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



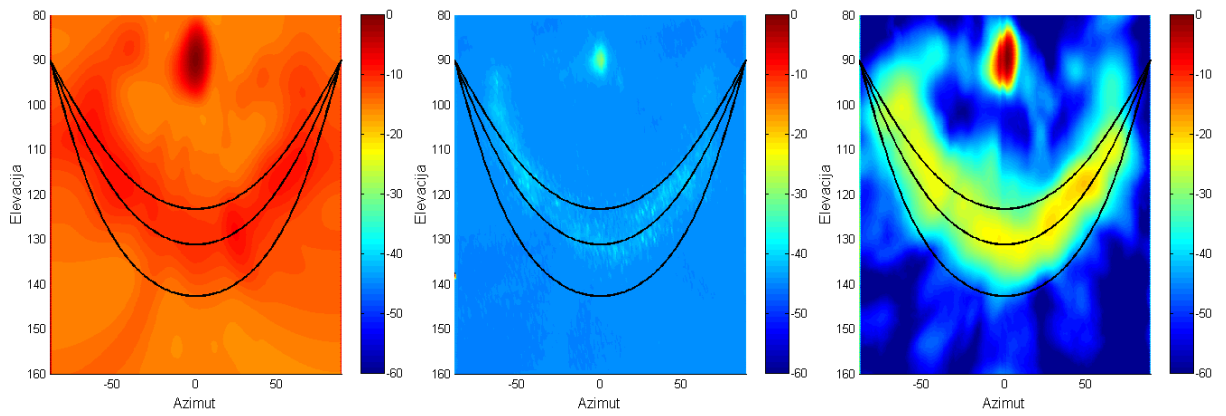
Slika 10.156 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



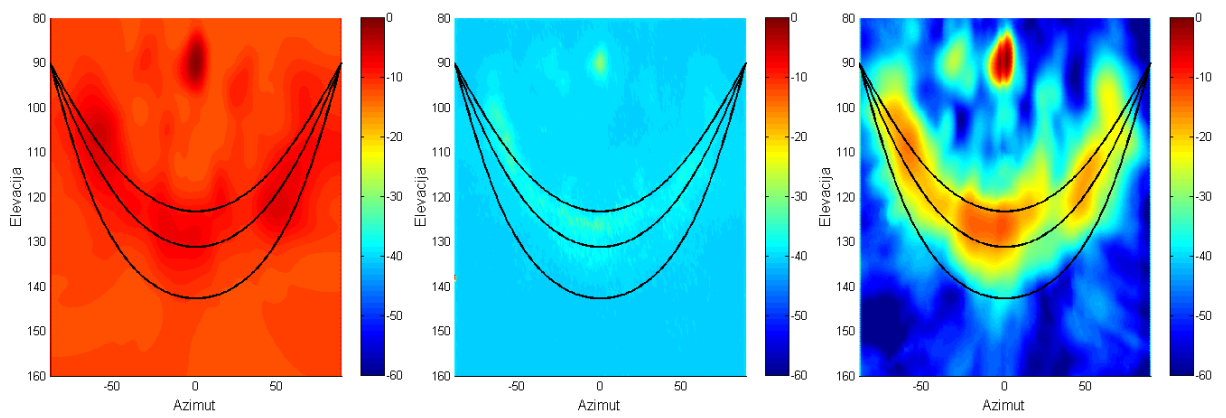
Slika 10.157 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



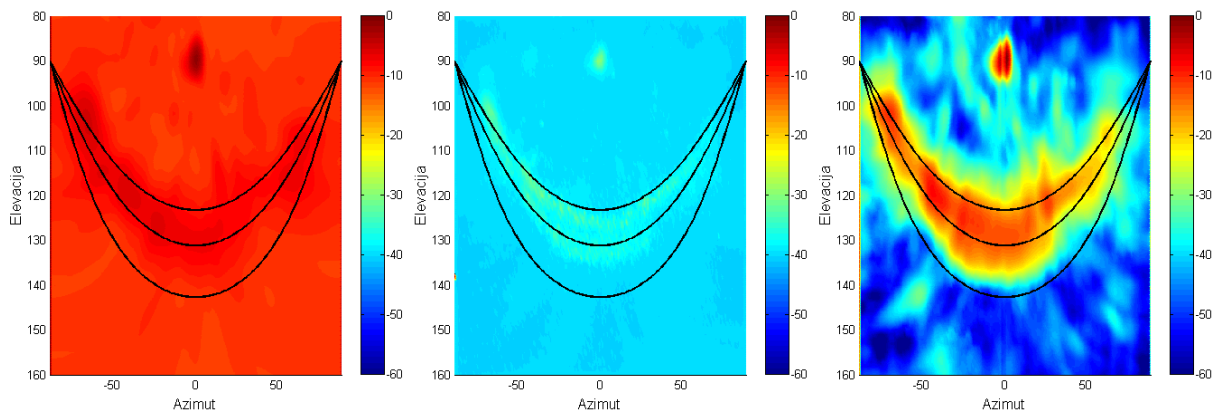
Slika 10.158 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



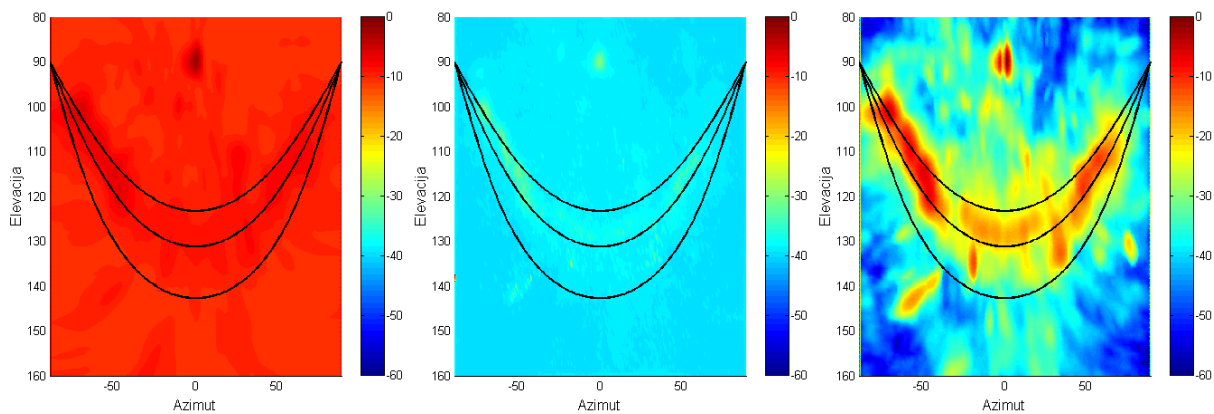
Slika 10.159 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



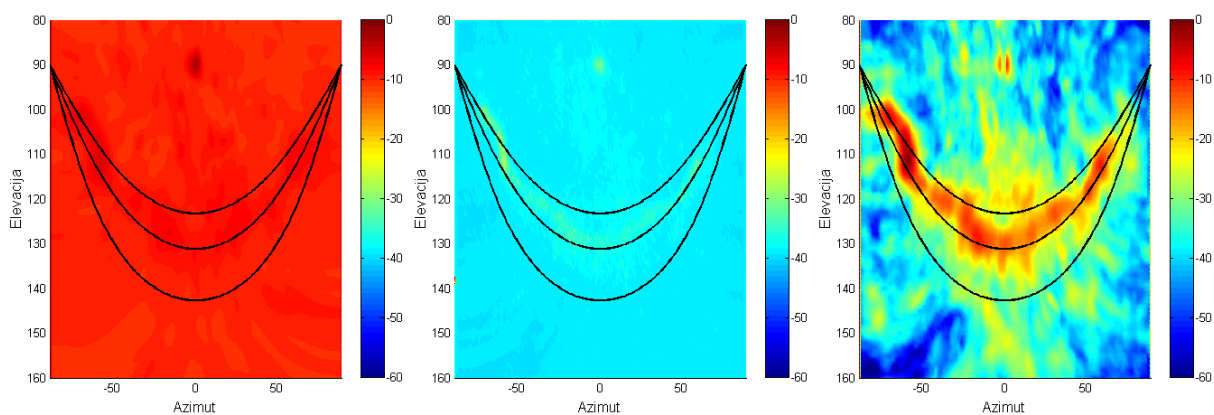
Slika 10.160 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.161 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz

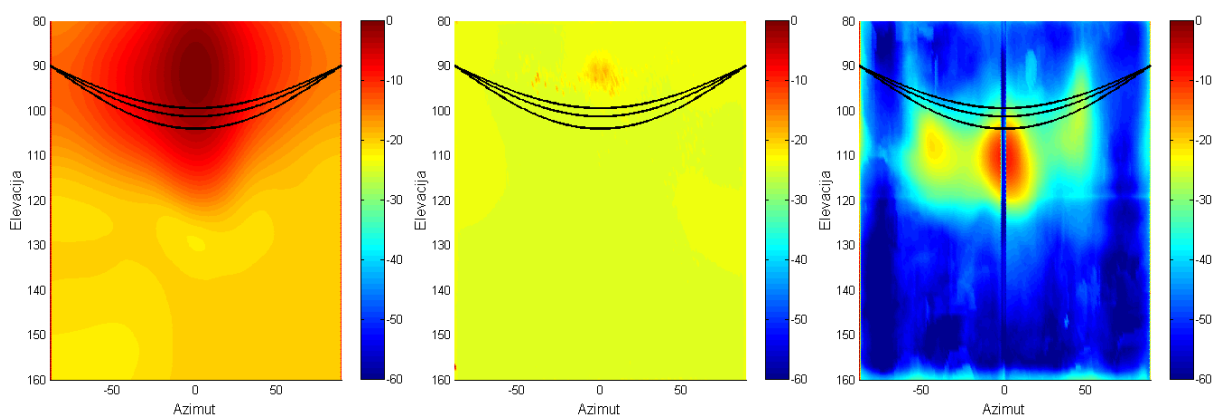


Slika 10.162 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz

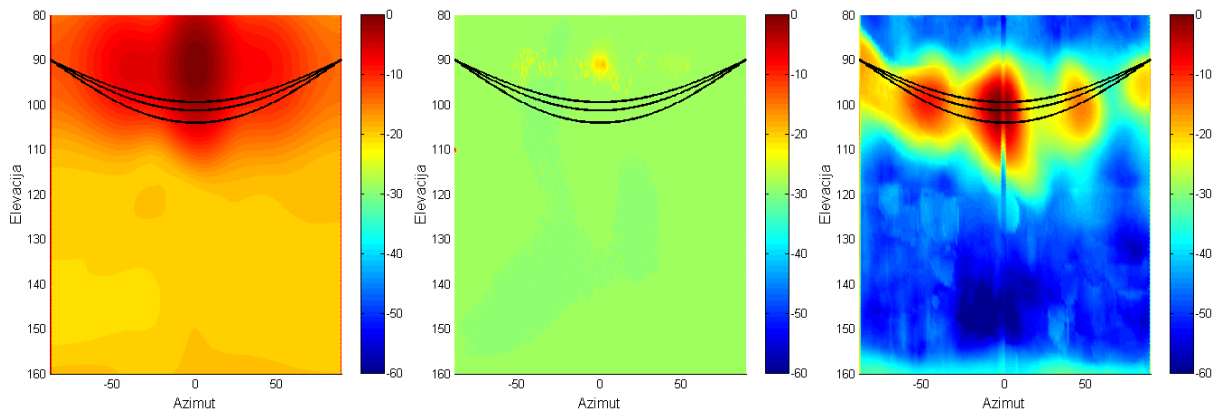


Slika 10.163 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

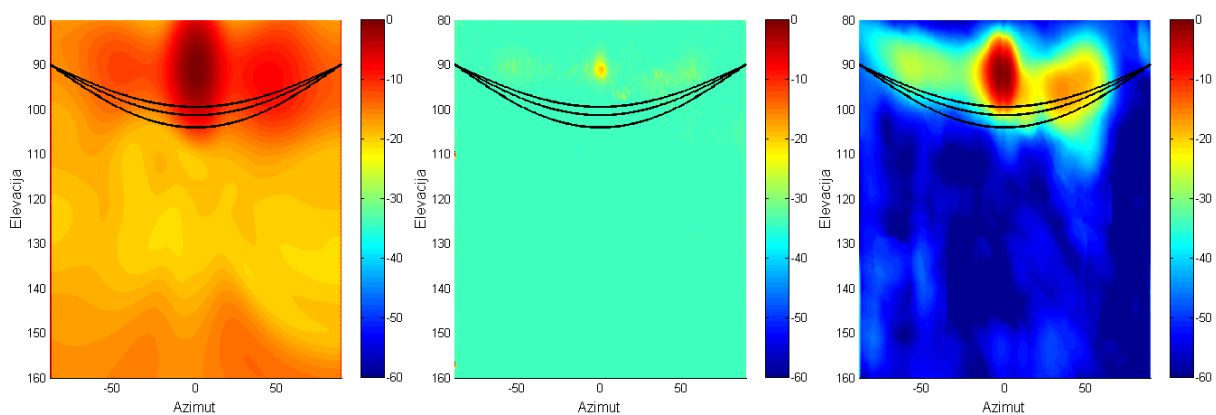
P5.12 Zgrada Tehnološkog fakulteta (Karnegijeva 4)



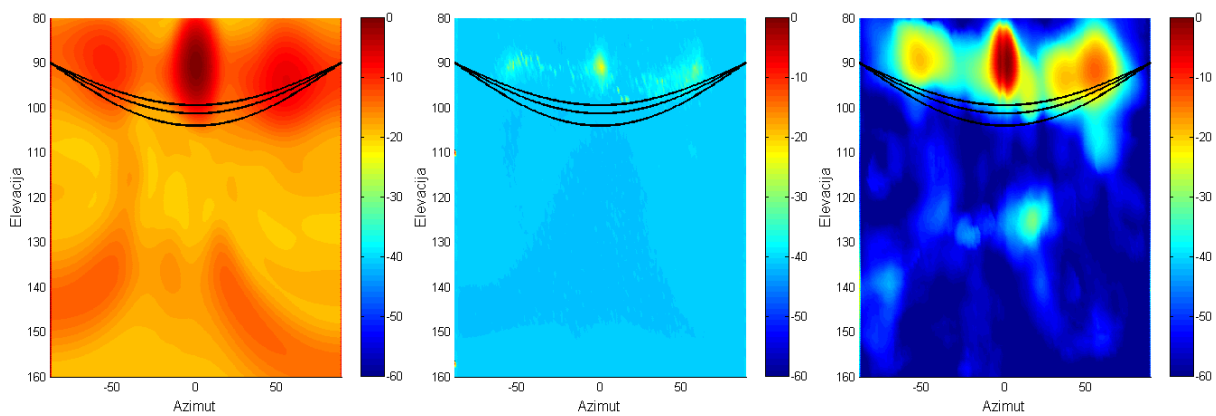
Slika 10.164 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



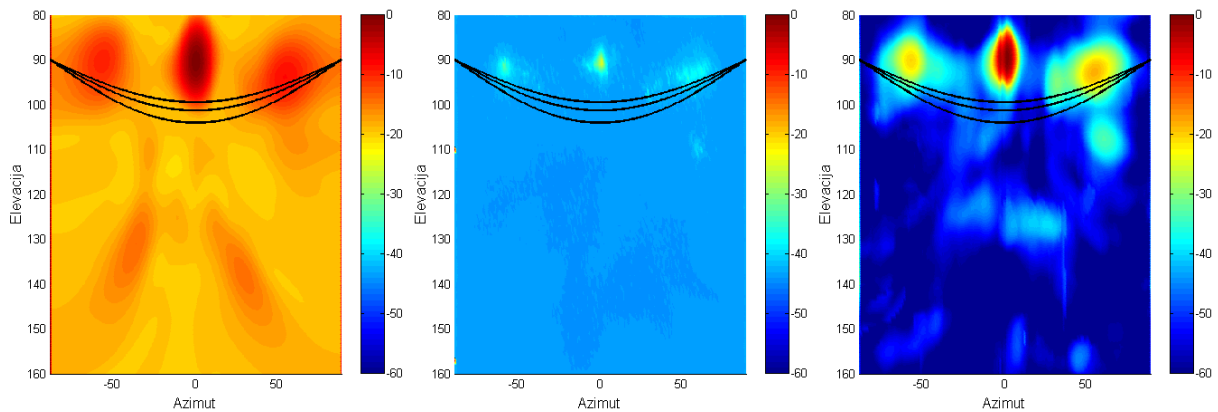
Slika 10.165 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



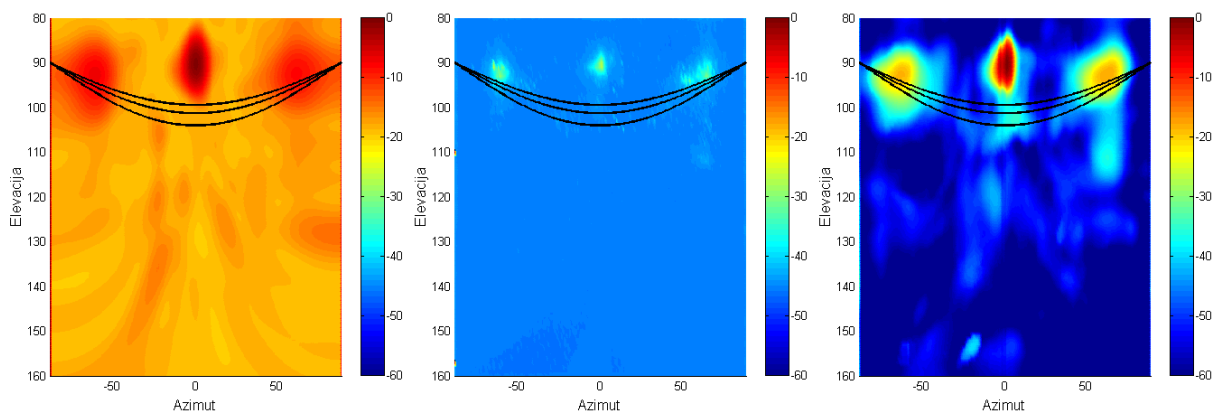
Slika 10.166 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



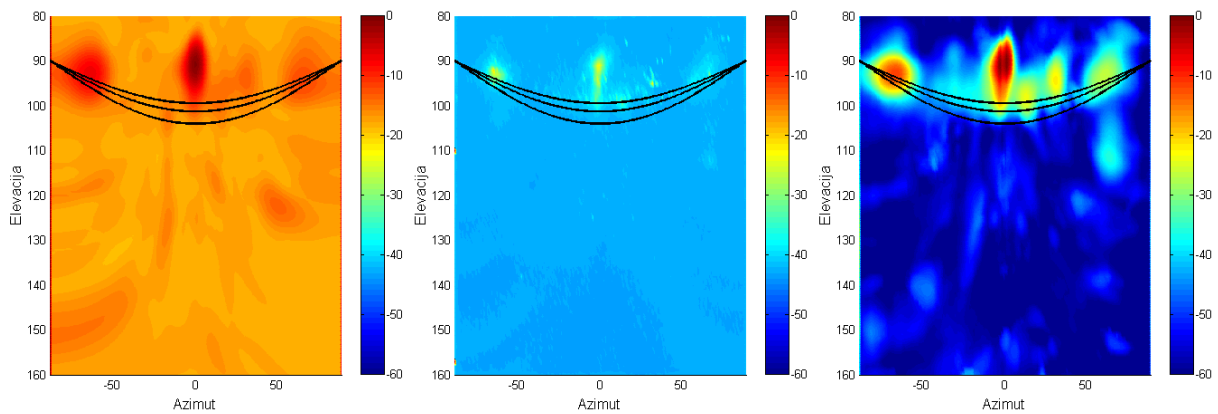
Slika 10.167 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



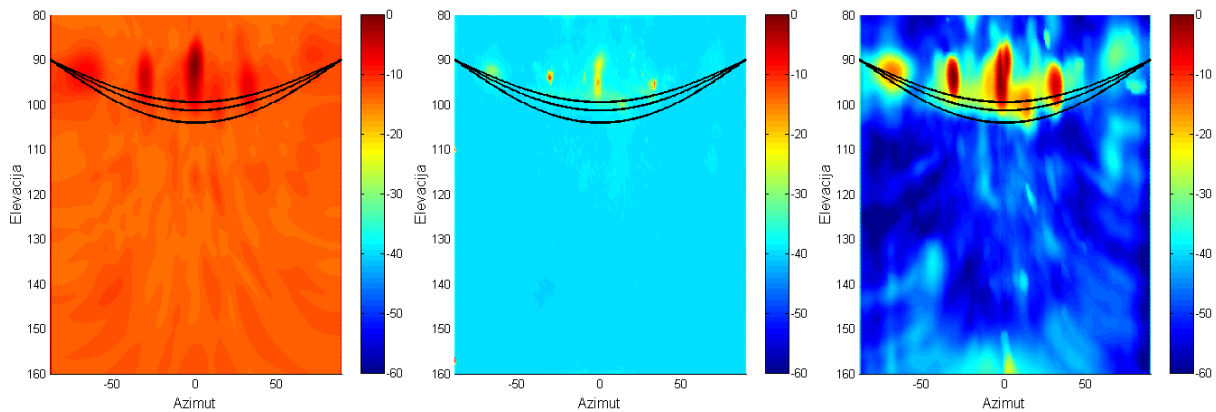
Slika 10.168 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



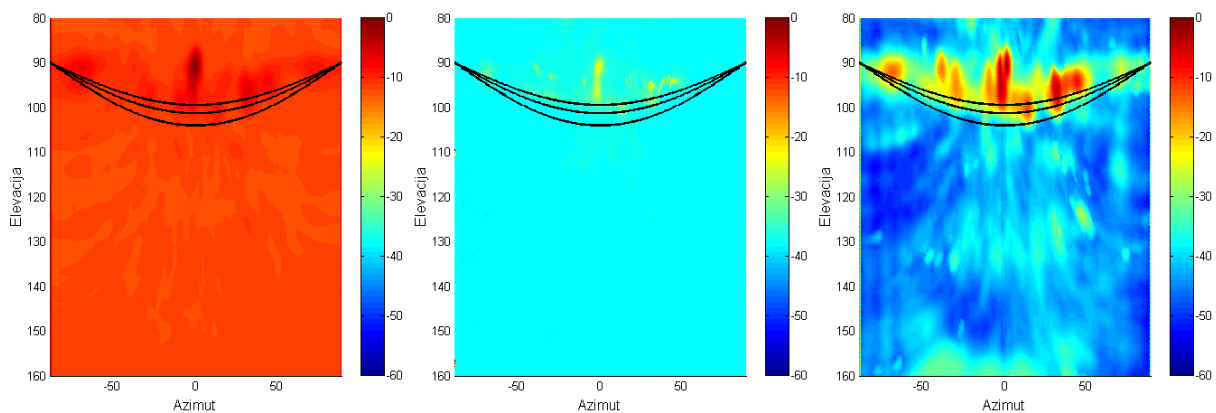
Slika 10.169 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



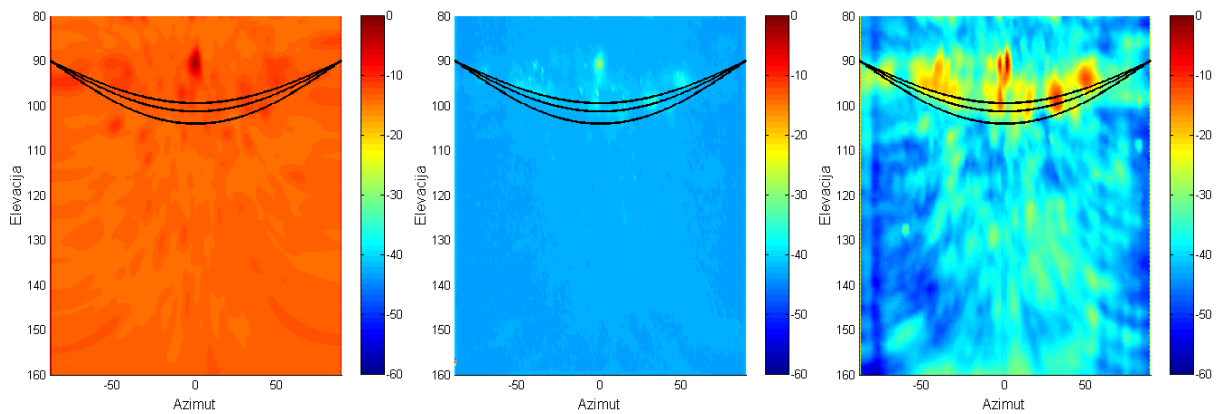
Slika 10.170 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.171 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz



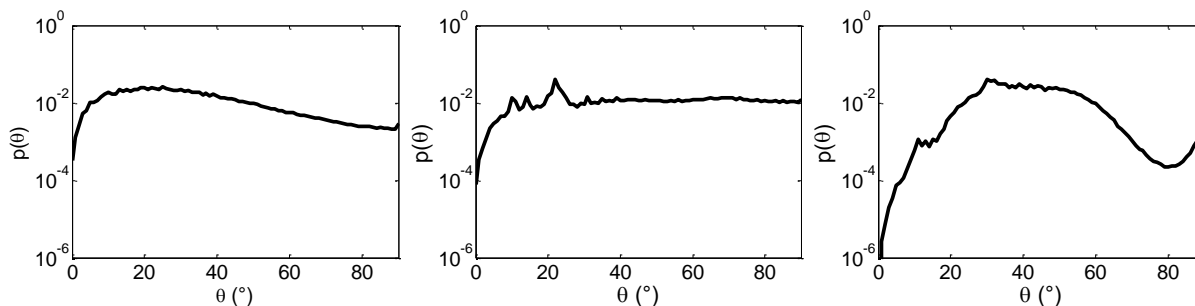
Slika 10.172 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz



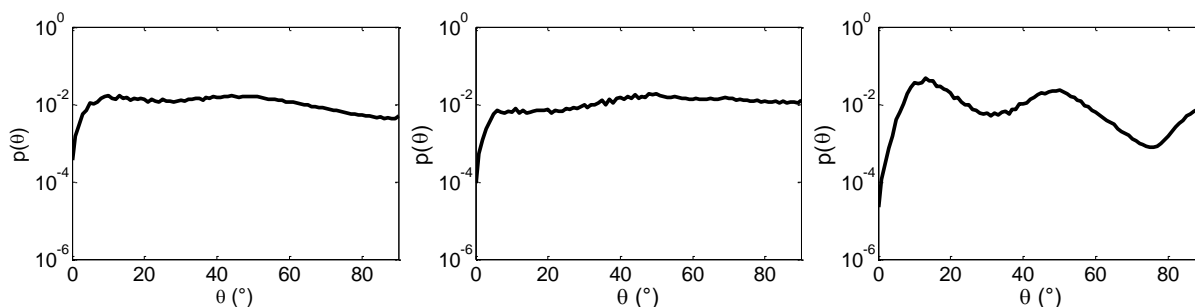
Slika 10.173 Rezultati dobijeni sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

P.6 Prikaz ugaonih raspodela energije na fasadi

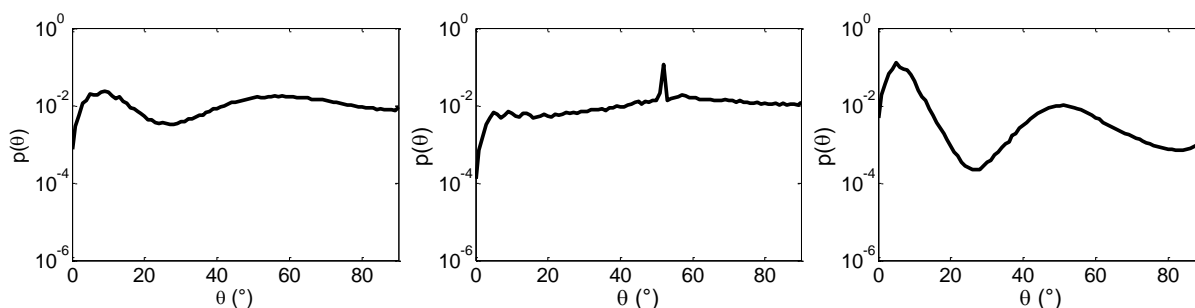
P6.1 Zgrada Bit (Cara Nikolaja II 21)



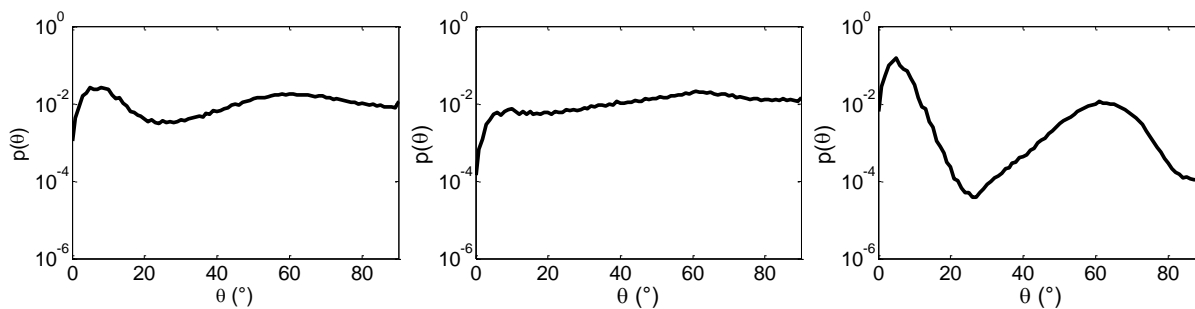
Slika 10.174 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



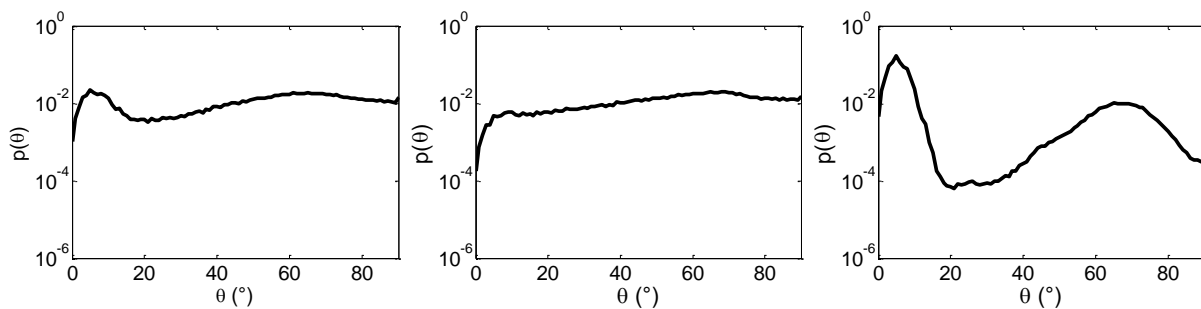
Slika 10.175 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



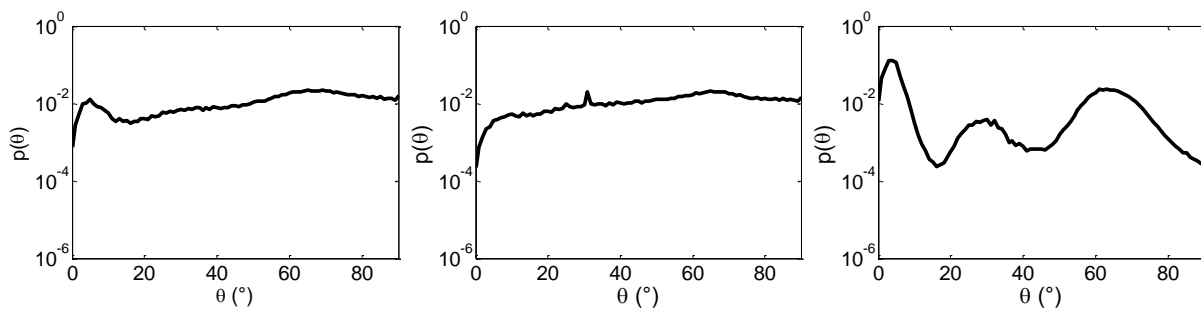
Slika 10.176 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



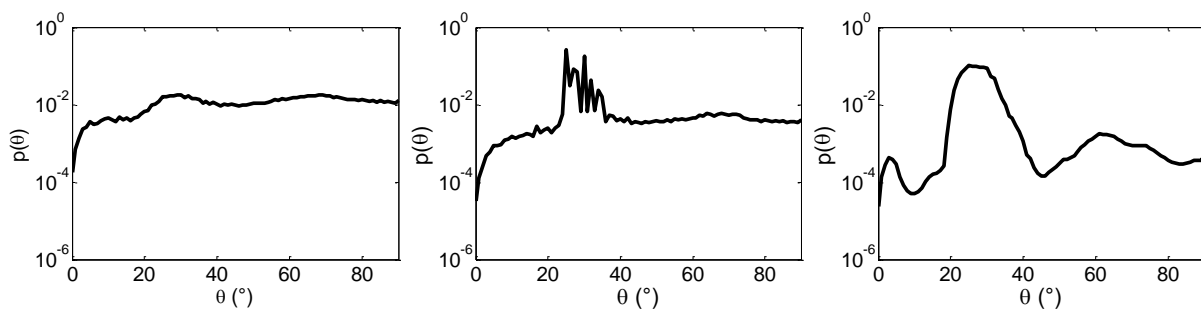
Slika 10.177 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



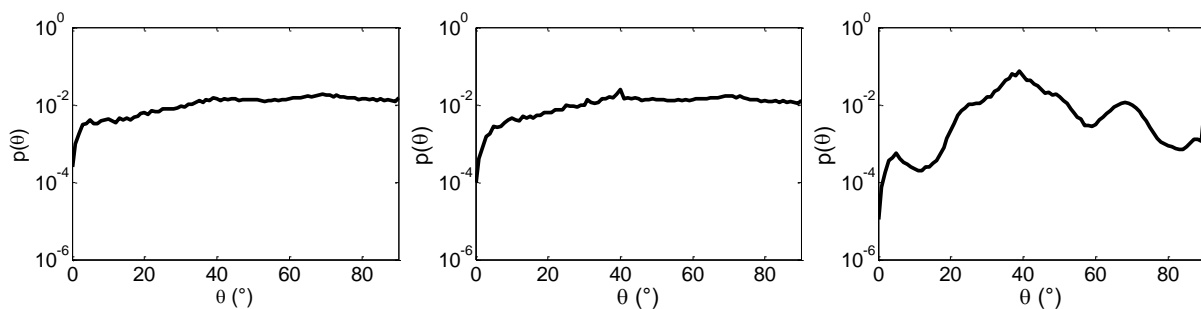
Slika 10.178 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



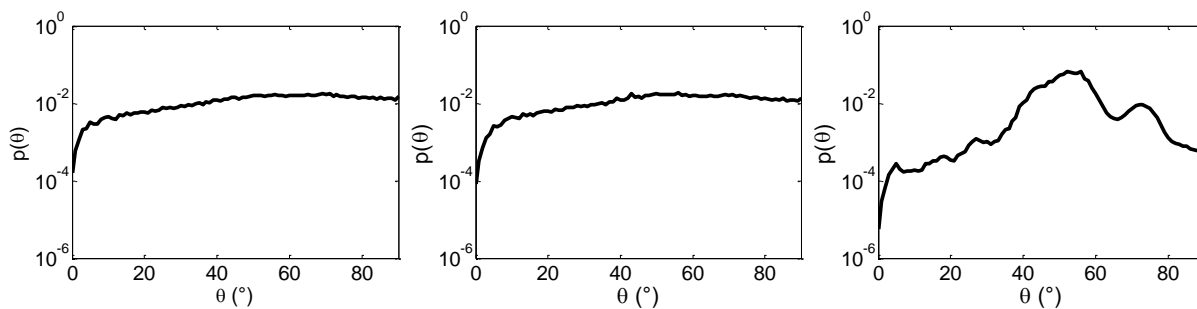
Slika 10.179 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



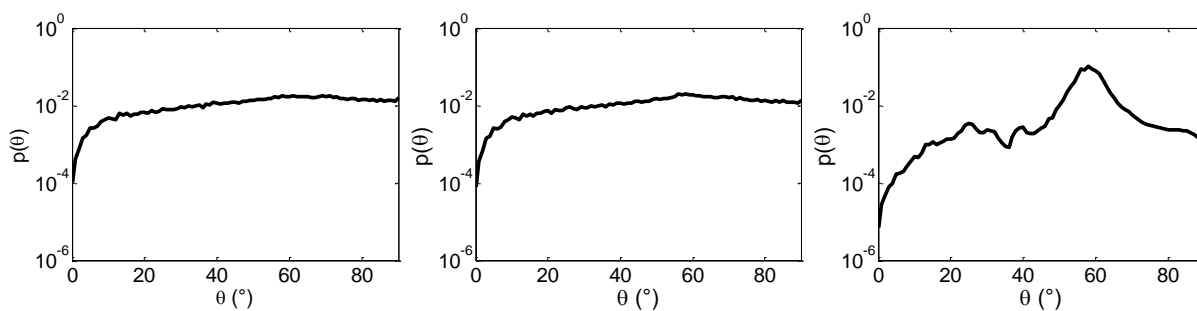
Slika 10.180 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.181 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz

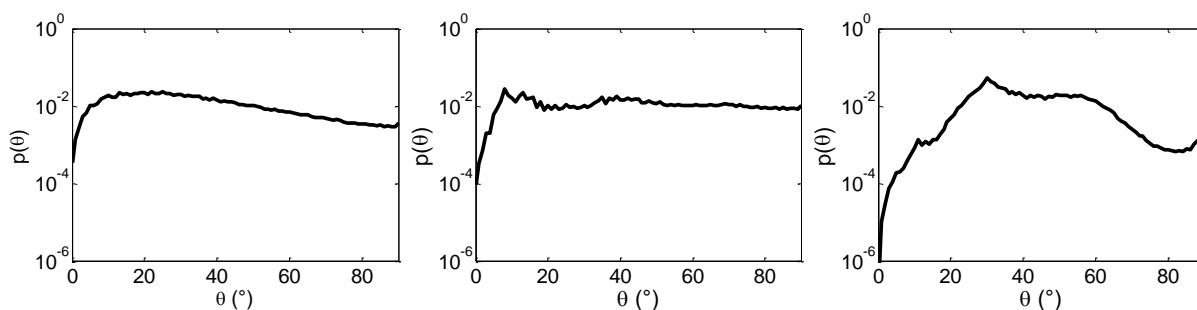


Slika 10.182 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz

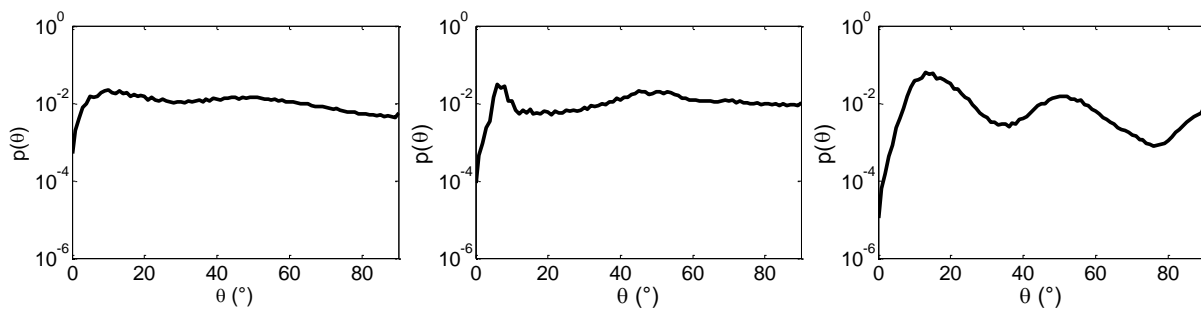


Slika 10.183 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

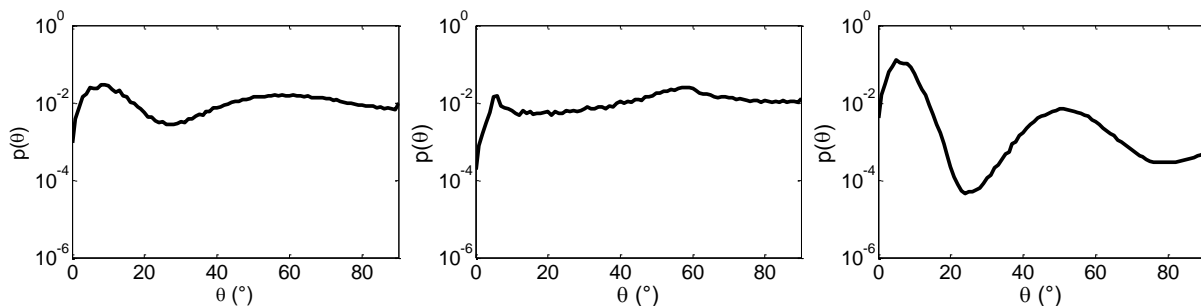
P6.2 Zgrada Bit (Cara Nikolaja II 21) – visina 2



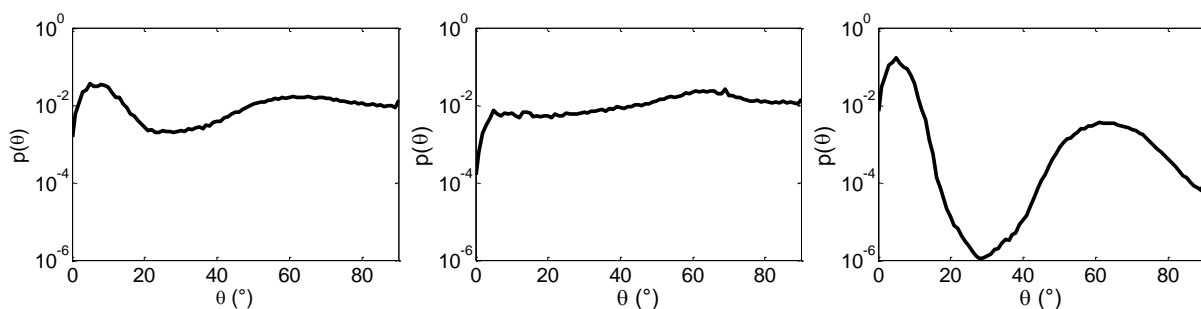
Slika 10.184 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



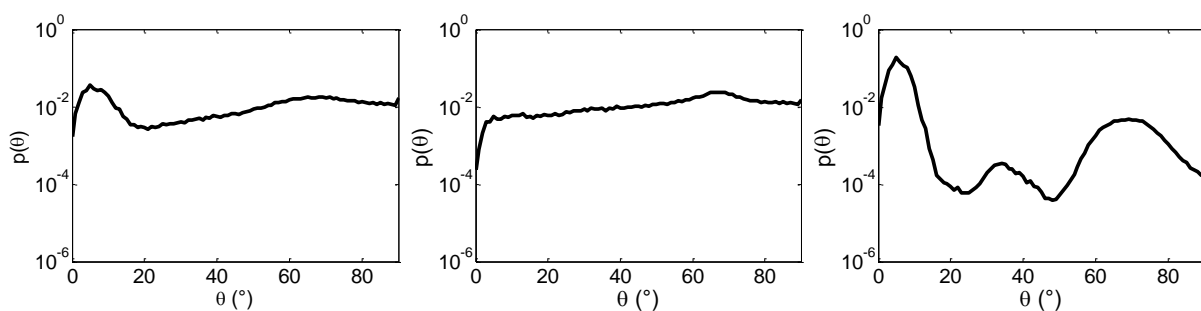
Slika 10.185 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



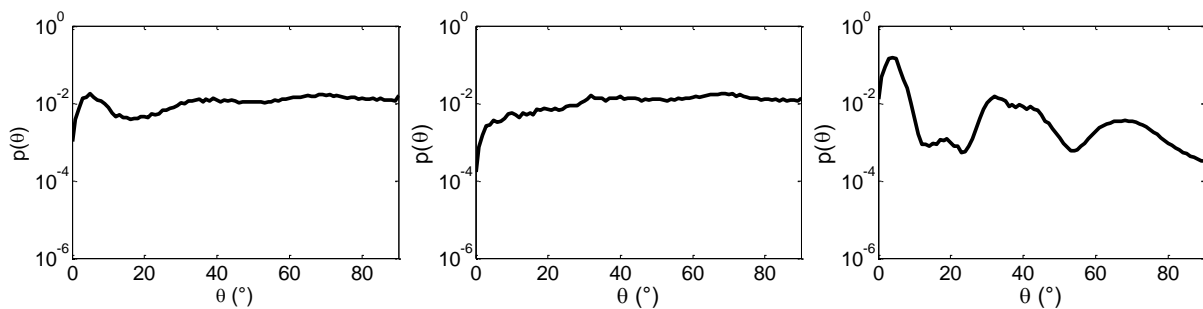
Slika 10.186 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



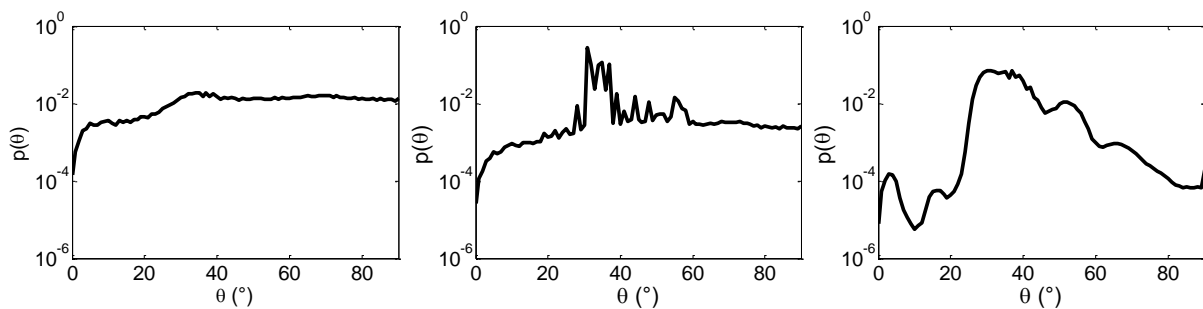
Slika 10.187 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



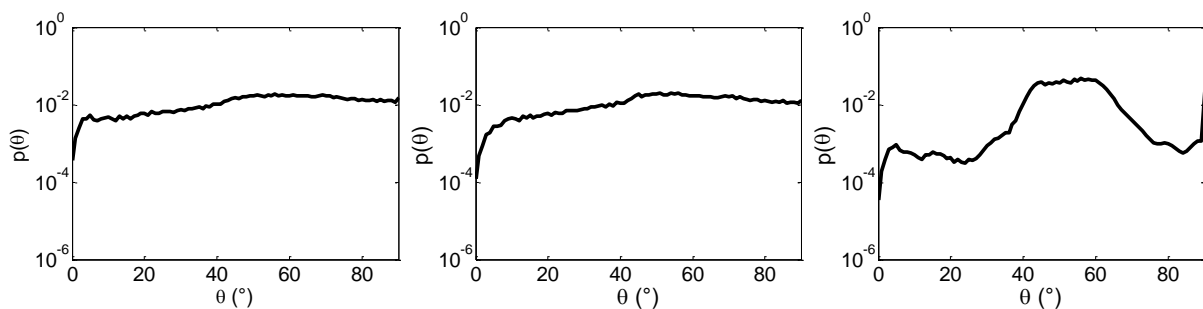
Slika 10.188 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



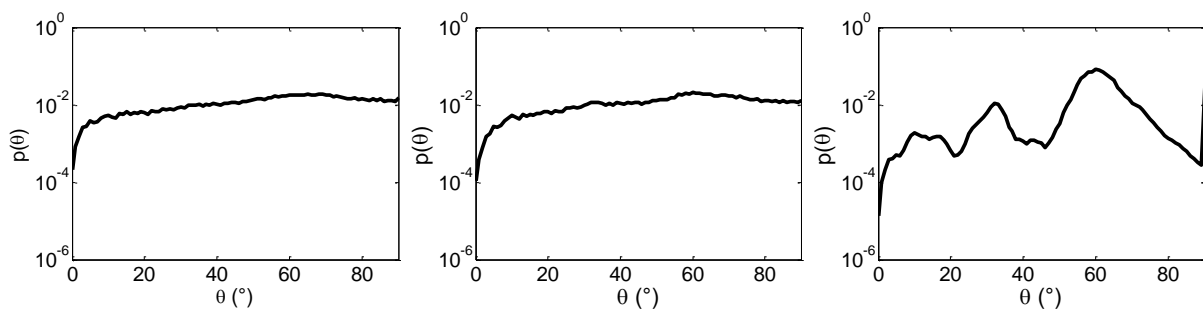
Slika 10.189 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



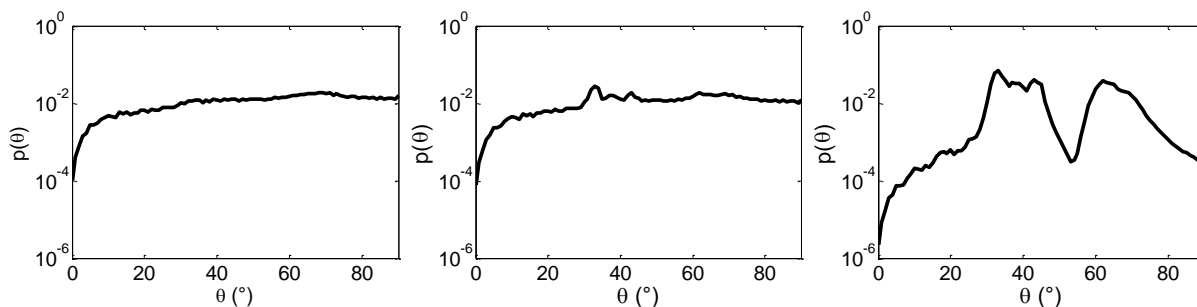
Slika 10.190 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.191 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz

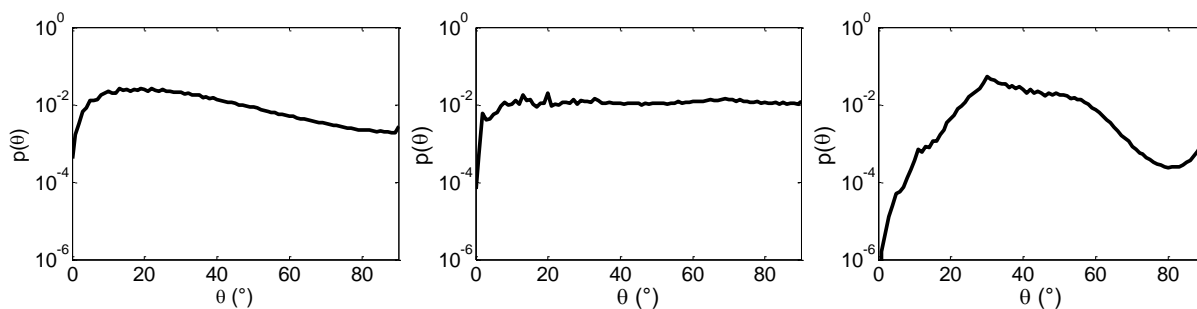


Slika 10.192 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz

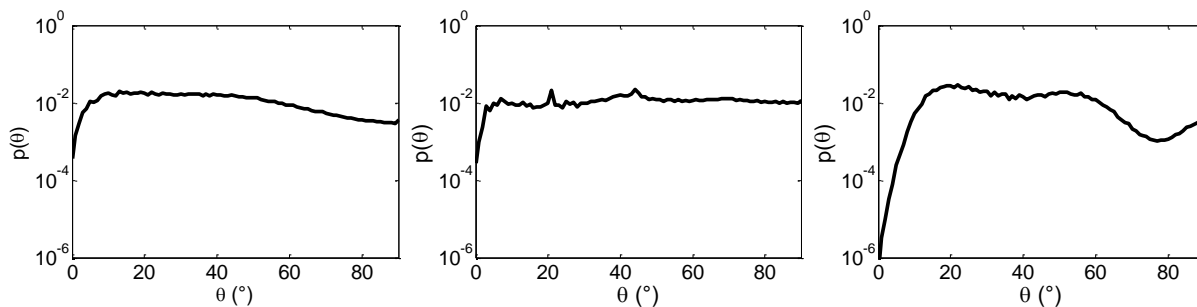


Slika 10.193 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

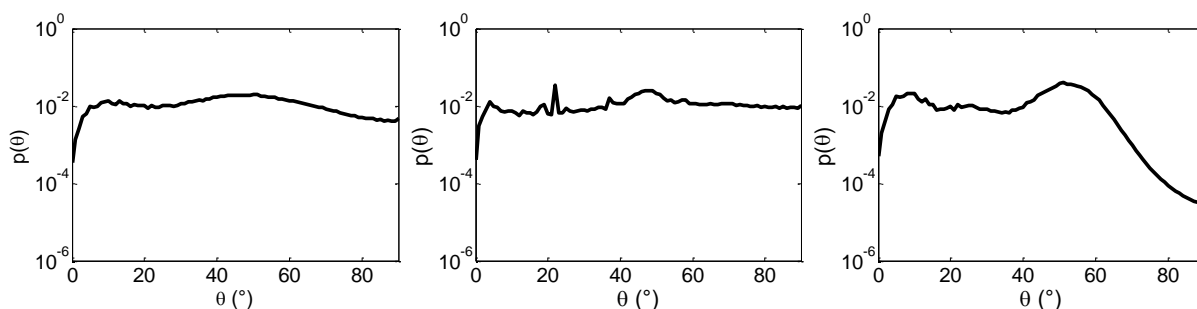
P6.3 Zgrada tehničkih fakulteta (Bulevar kralja Aleksandra 73 – bočno)



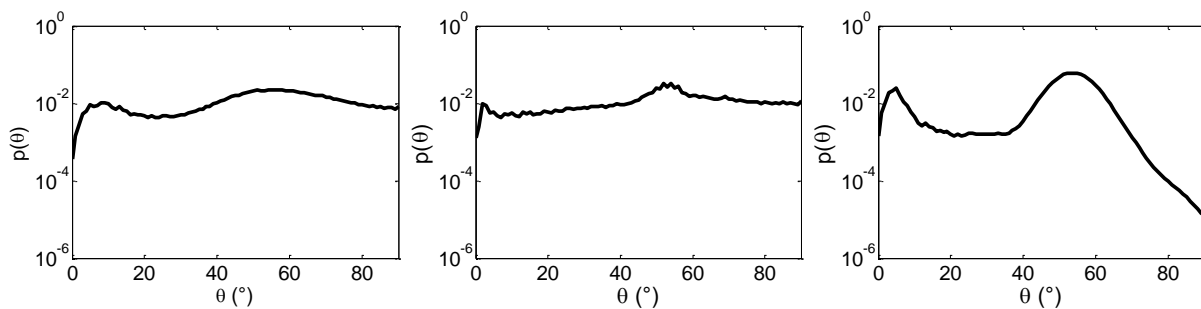
Slika 10.194 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



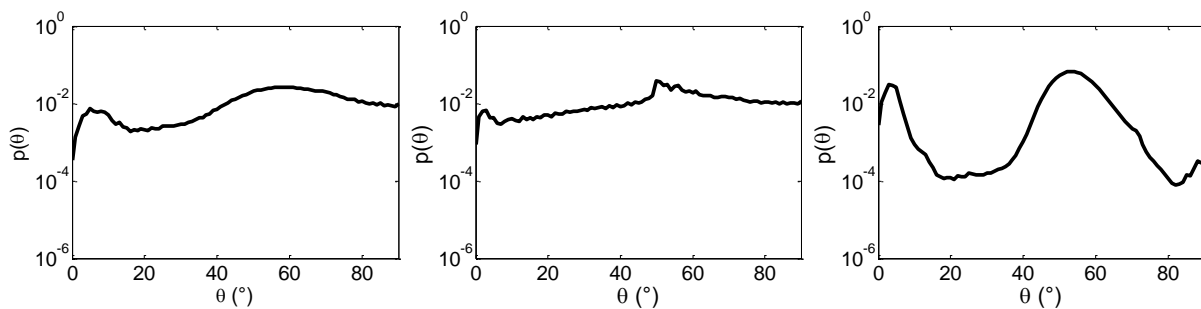
Slika 10.195 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



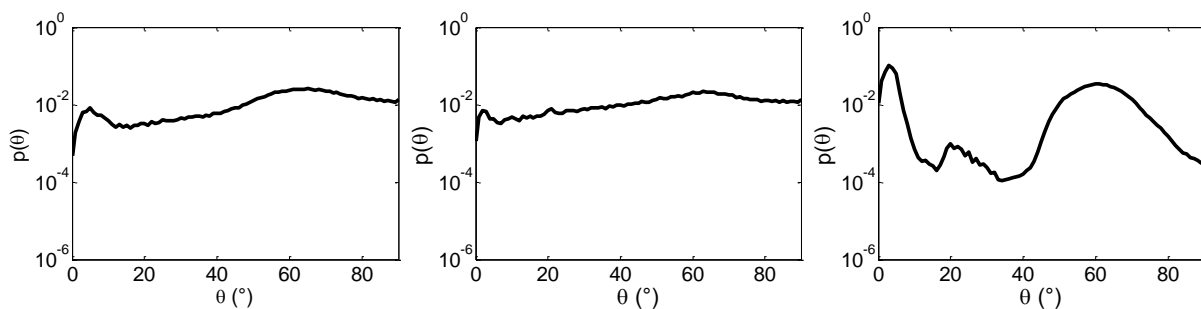
Slika 10.196 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



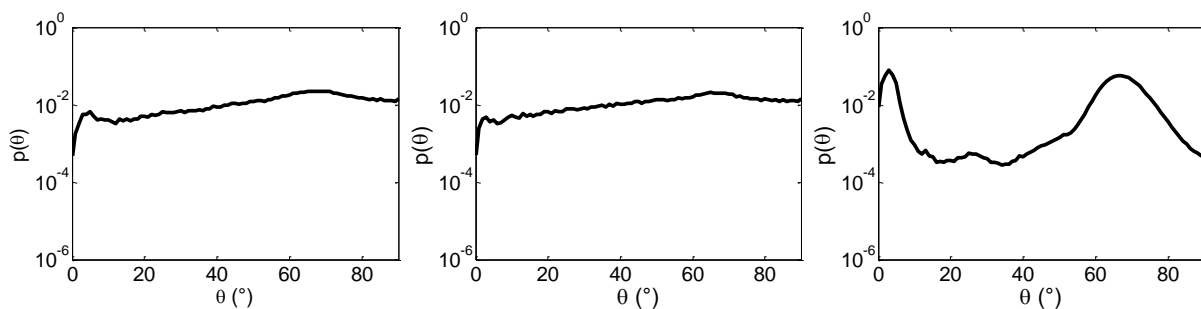
Slika 10.197 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



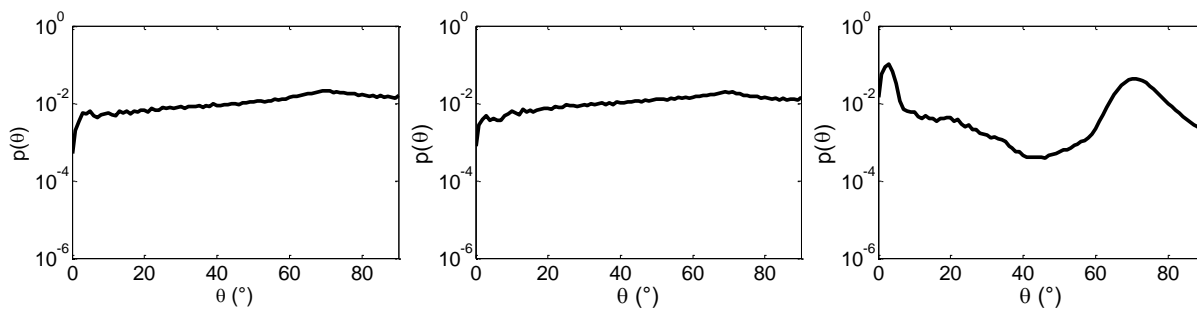
Slika 10.198 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



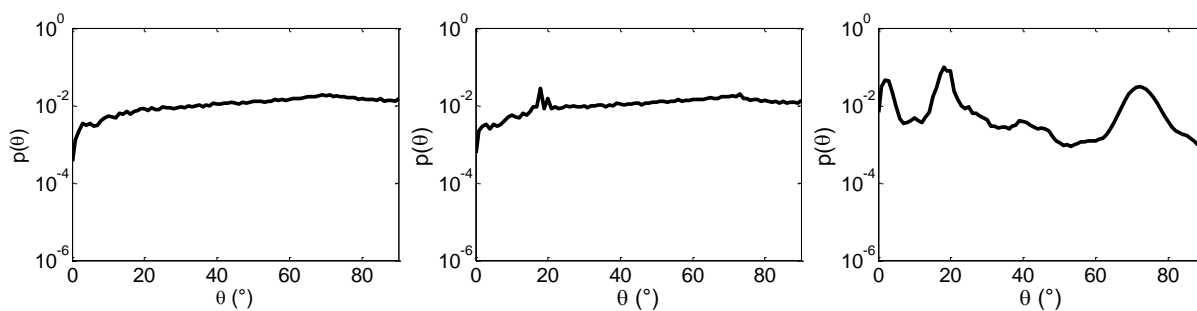
Slika 10.199 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



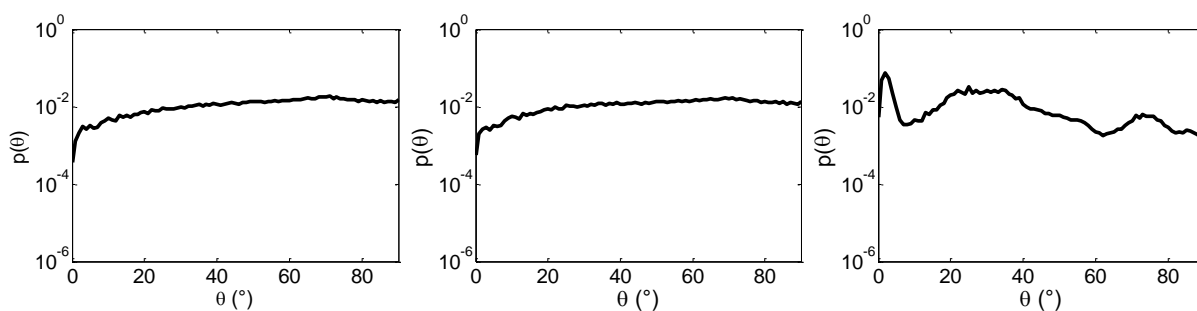
Slika 10.200 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.201 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz

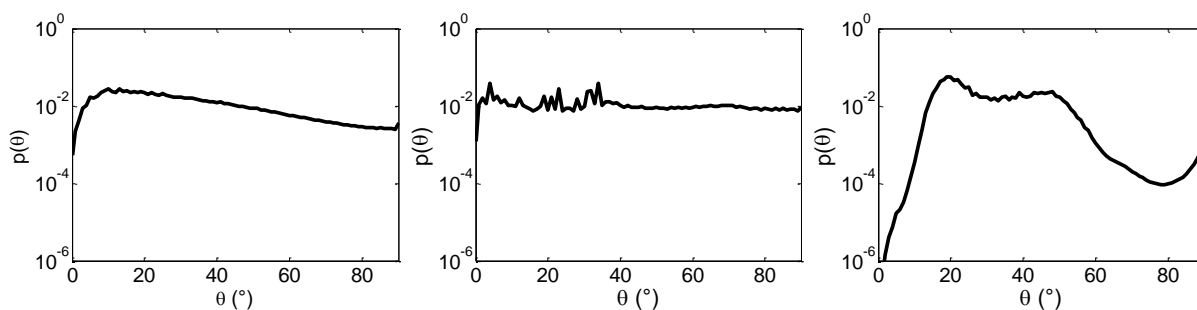


Slika 10.202 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz

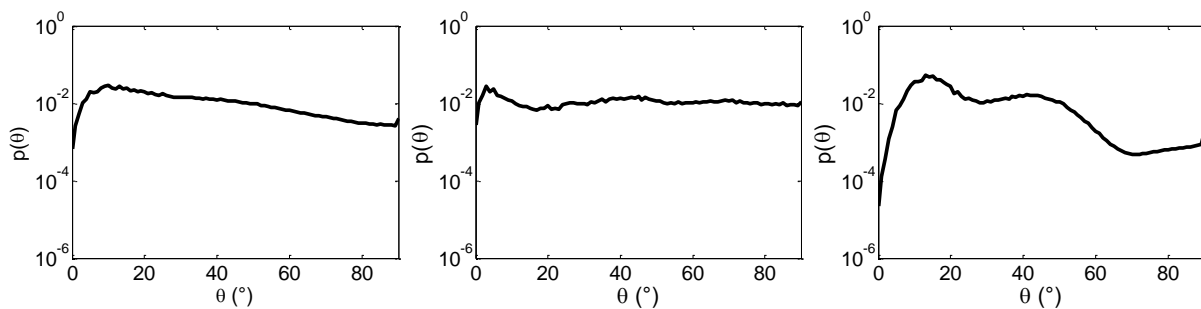


Slika 10.203 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

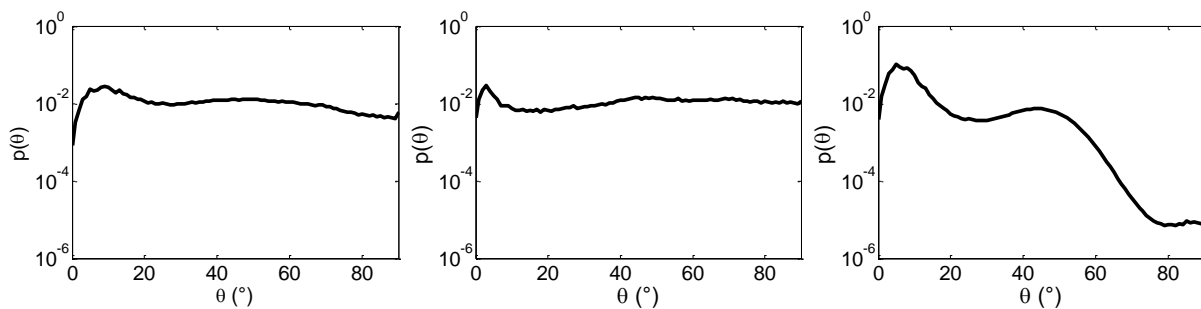
P6.4 Zgrada tehničkih fakulteta (Bulevar kralja Aleksandra 73)



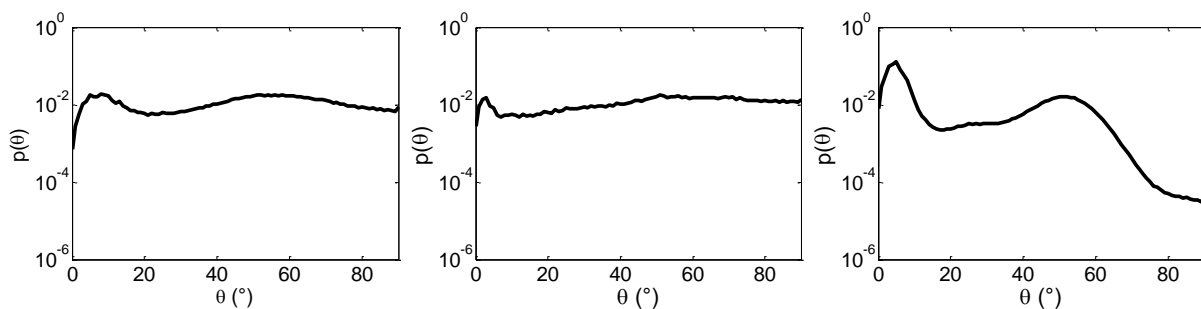
Slika 10.204 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



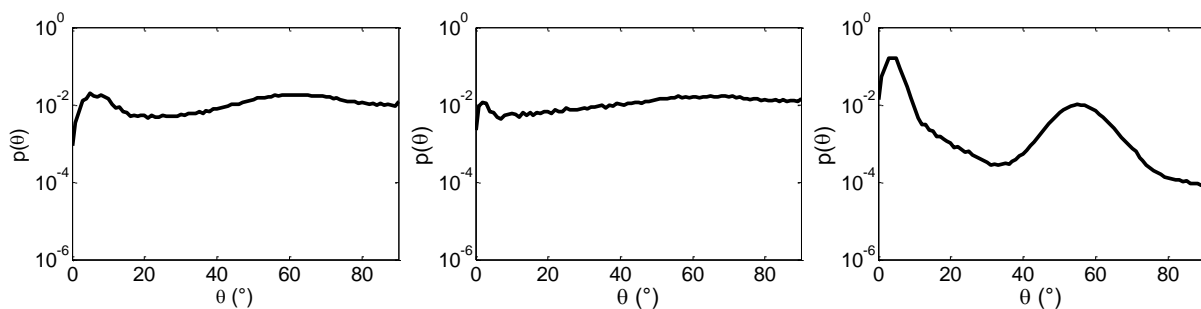
Slika 10.205 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



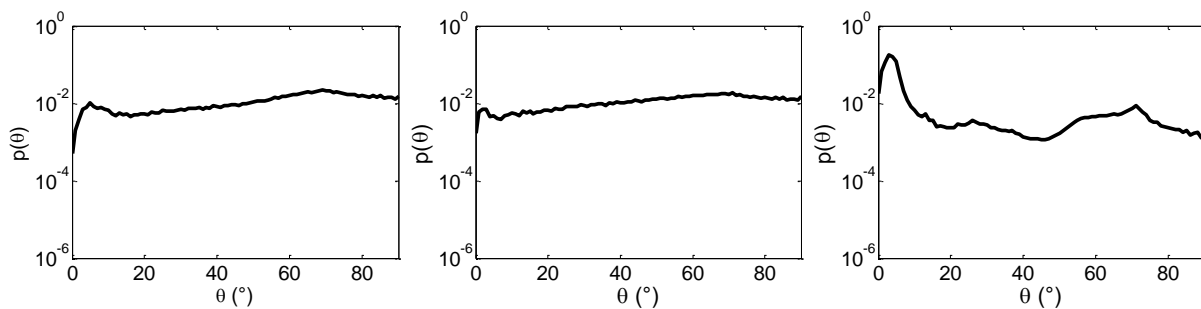
Slika 10.206 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



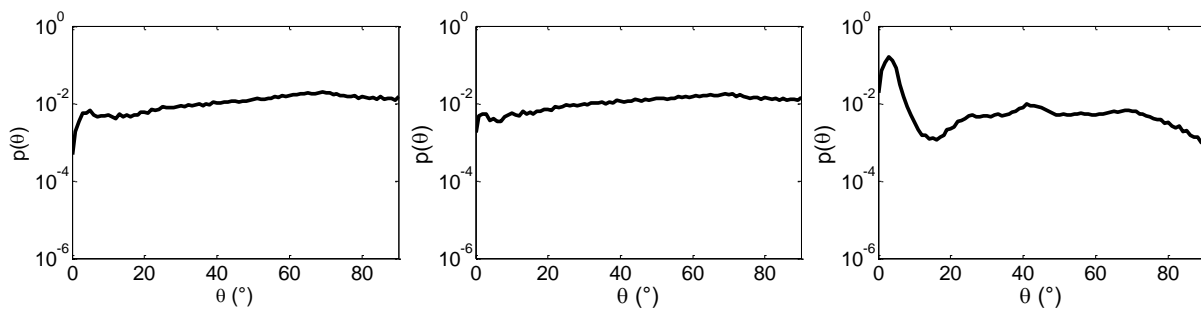
Slika 10.207 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



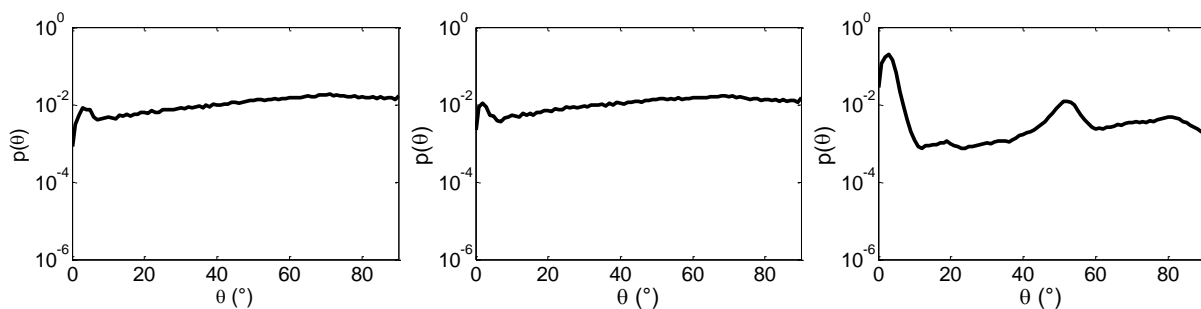
Slika 10.208 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



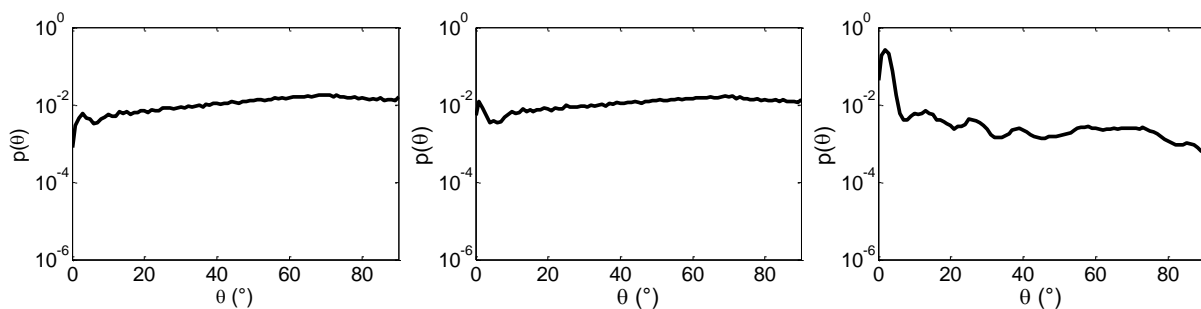
Slika 10.209 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



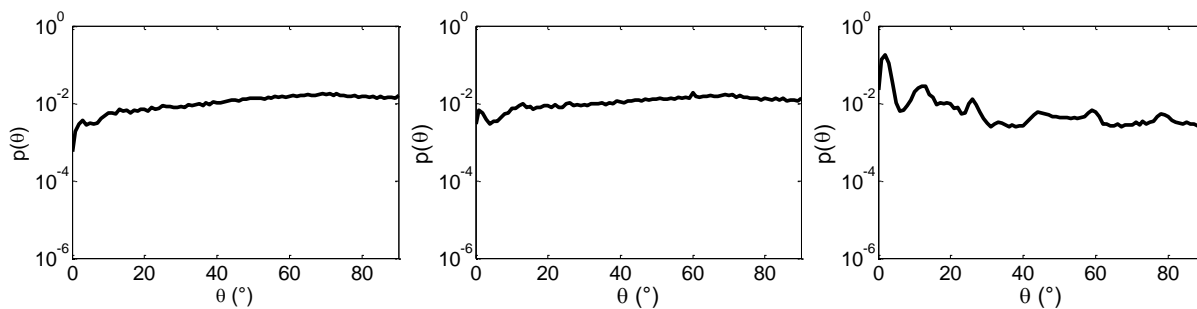
Slika 10.210 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.211 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz

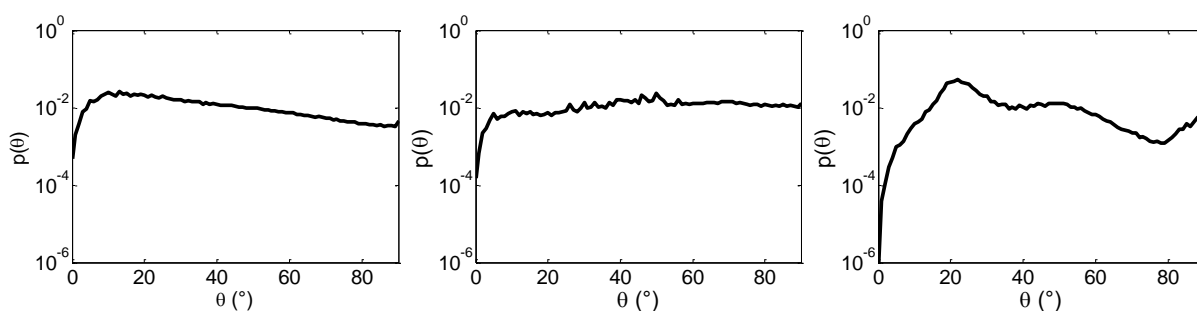


Slika 10.212 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz

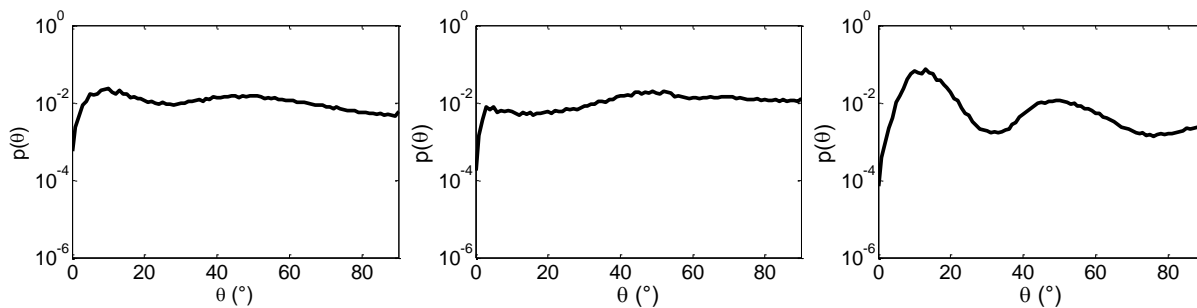


Slika 10.213 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

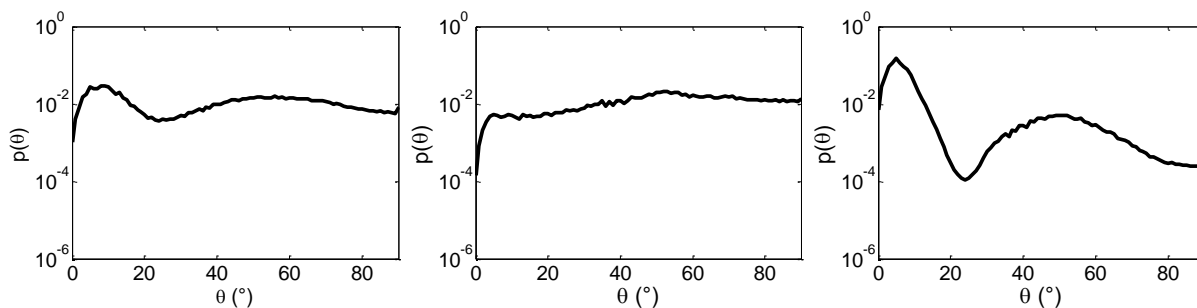
P6.5 Zgrada Molerova (Molerova 70)



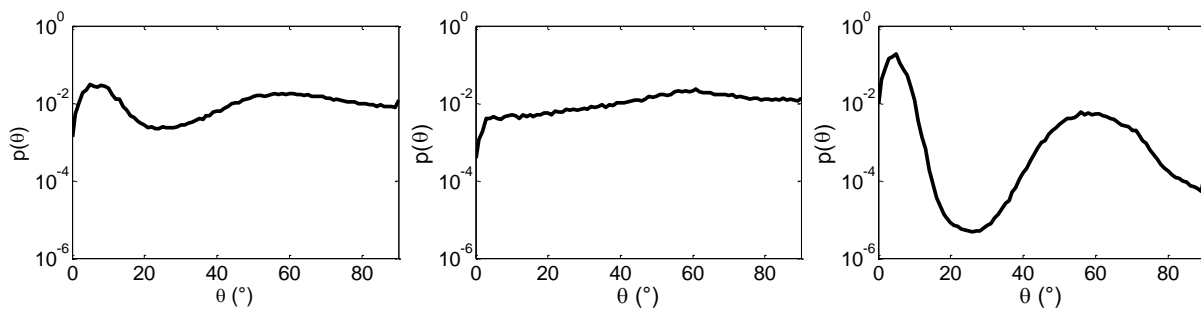
Slika 10.214 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



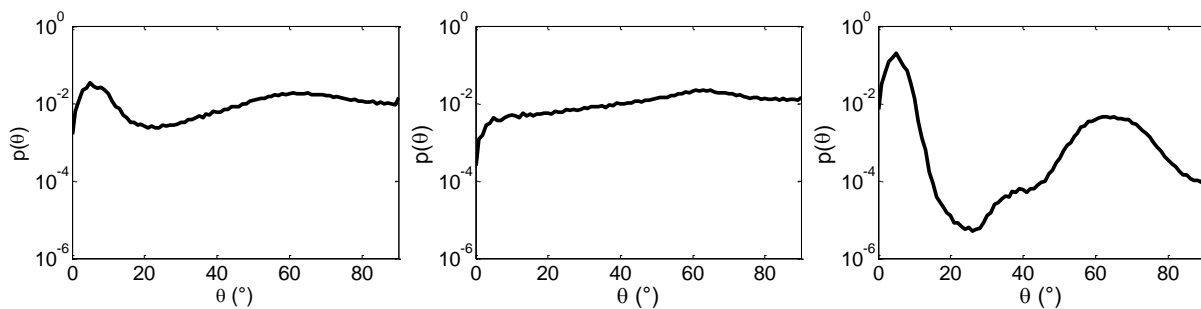
Slika 10.215 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



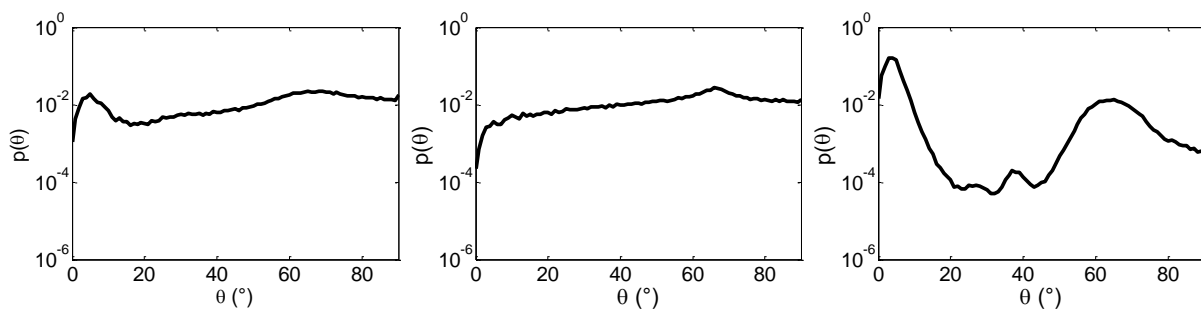
Slika 10.216 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



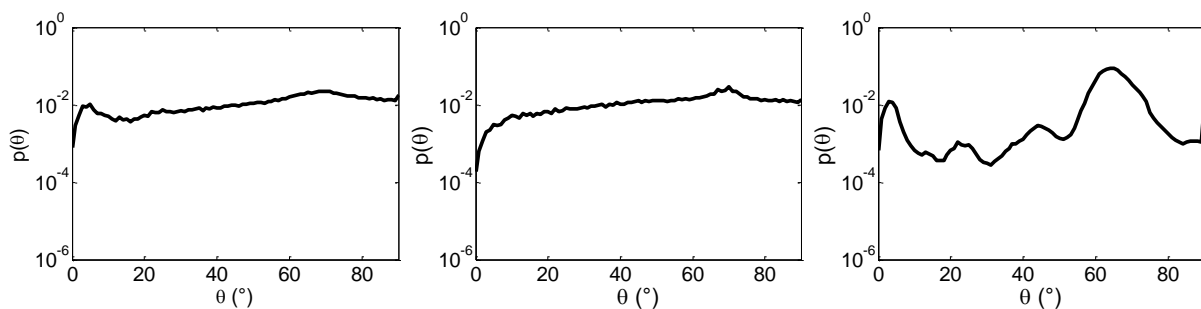
Slika 10.217 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



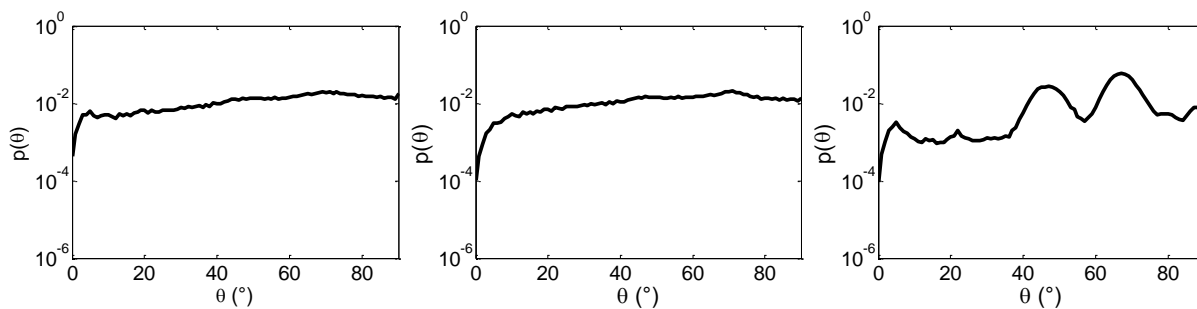
Slika 10.218 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



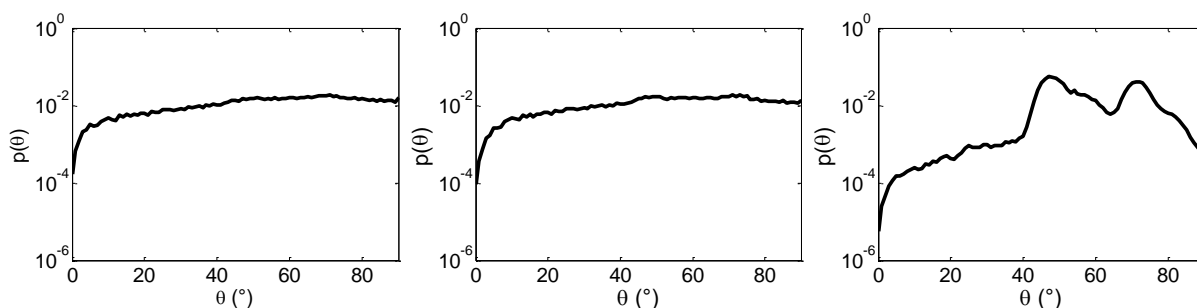
Slika 10.219 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



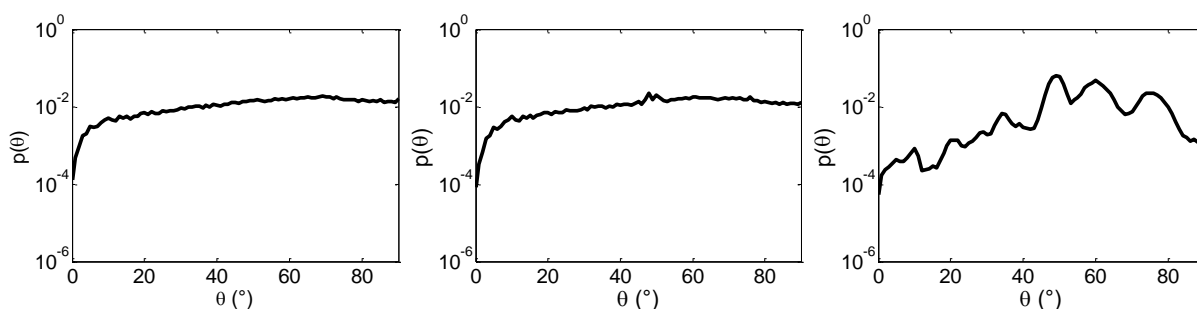
Slika 10.220 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.221 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz

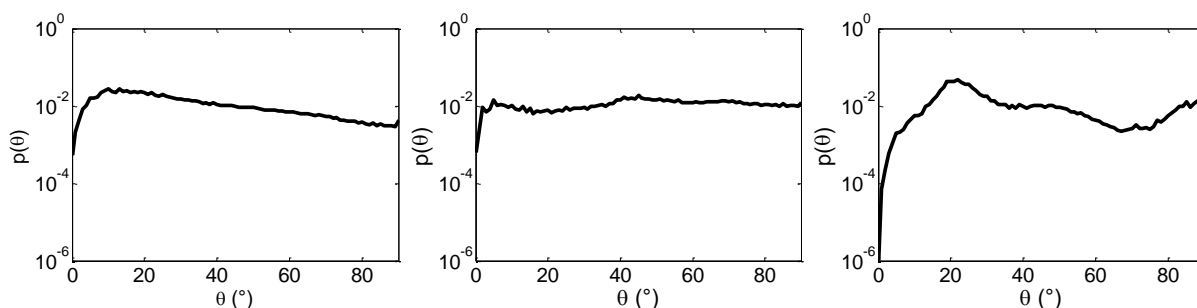


Slika 10.222 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz

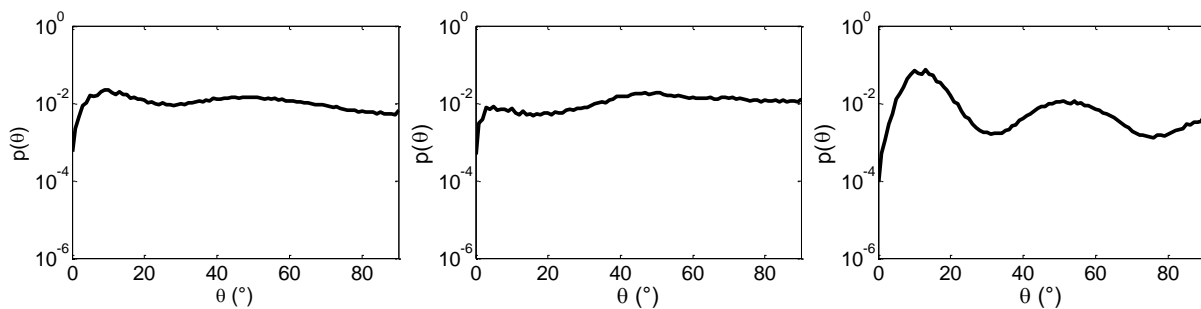


Slika 10.223 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

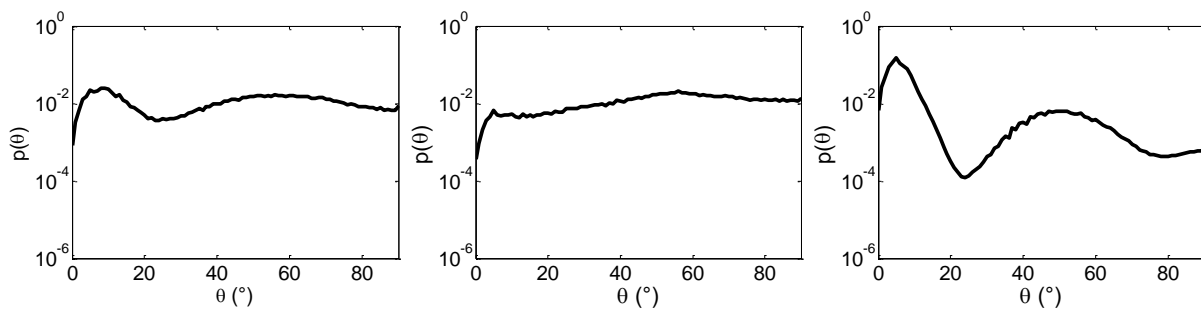
P6.6 Zgrada Molerova (Molerova 70) – visina 2



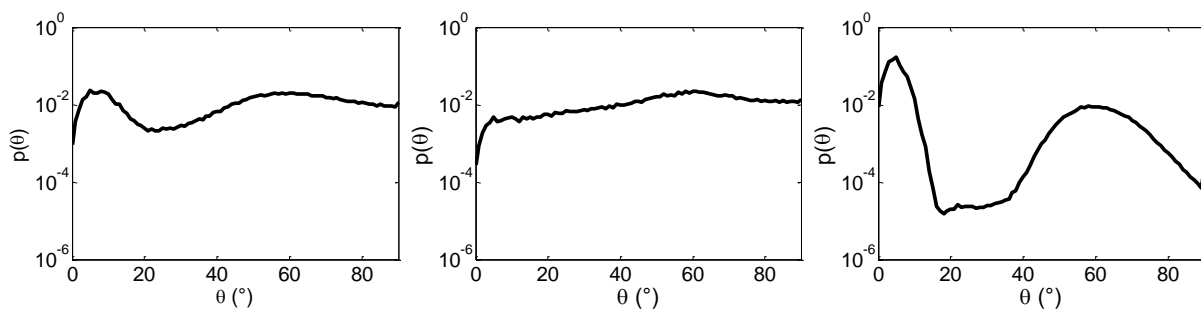
Slika 10.224 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



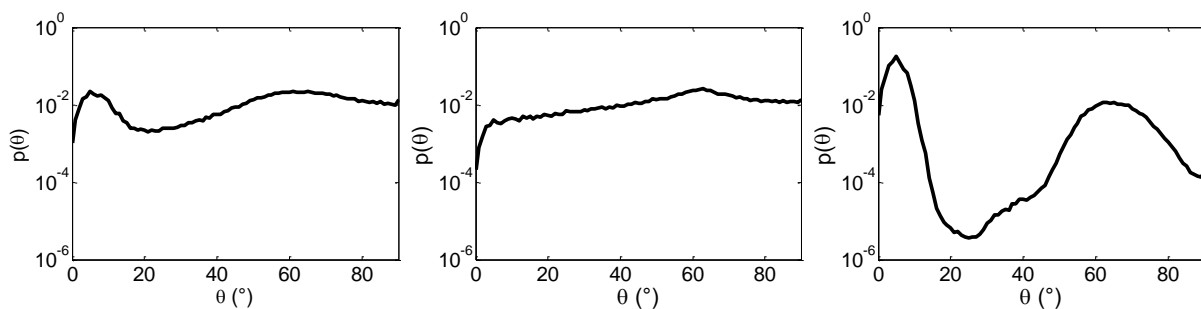
Slika 10.225 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



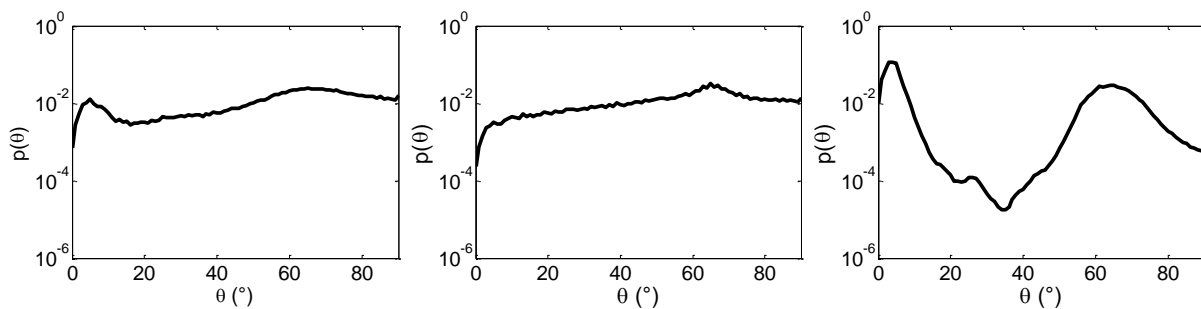
Slika 10.226 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



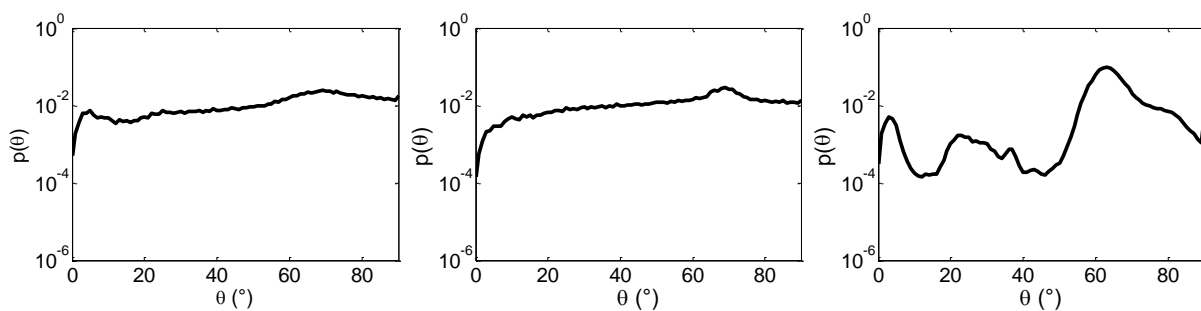
Slika 10.227 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



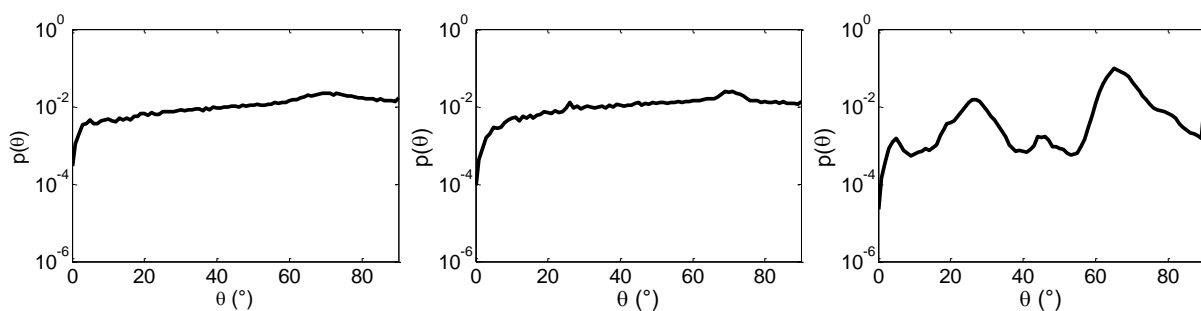
Slika 10.228 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



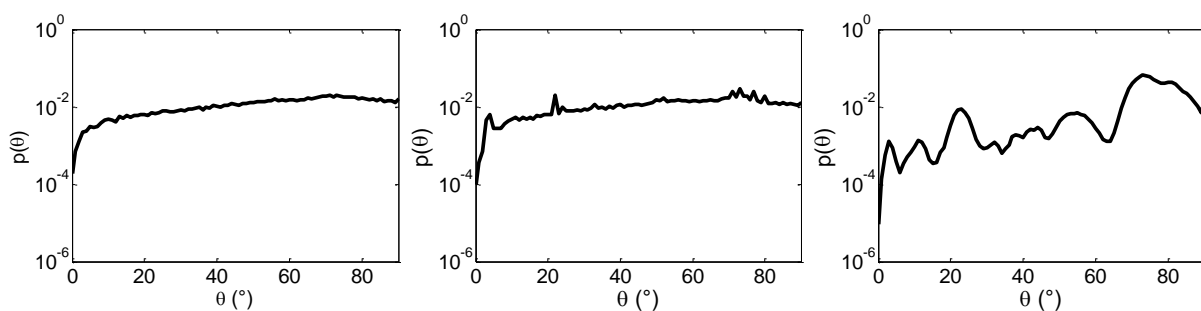
Slika 10.229 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



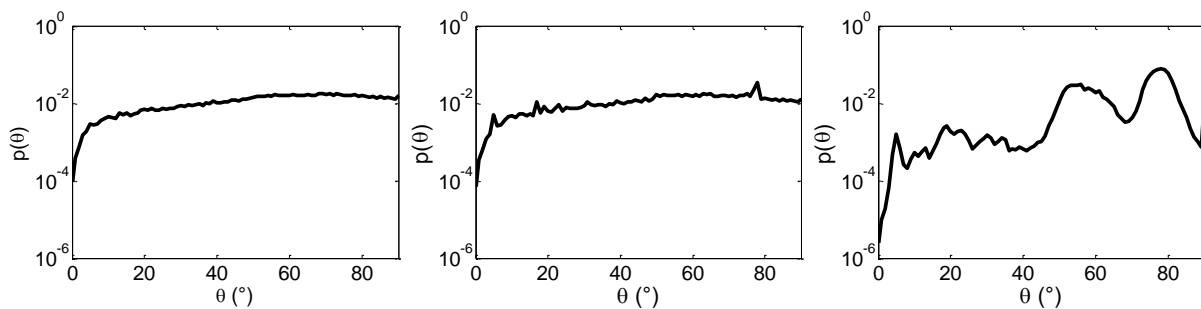
Slika 10.230 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.231 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz

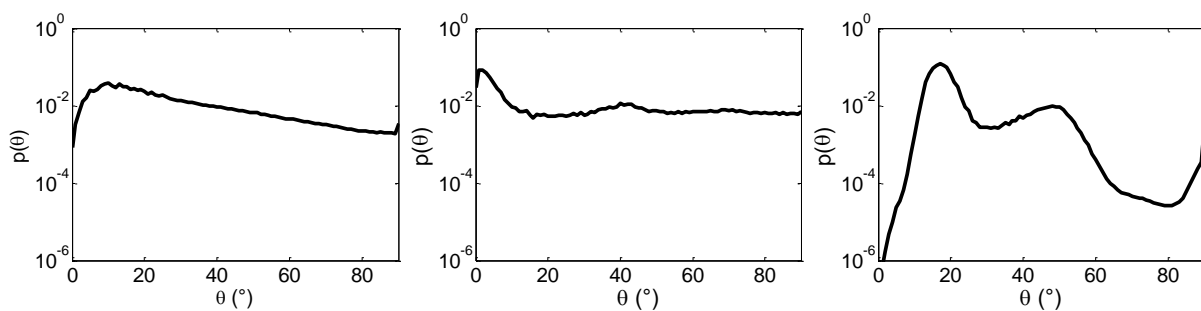


Slika 10.232 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz

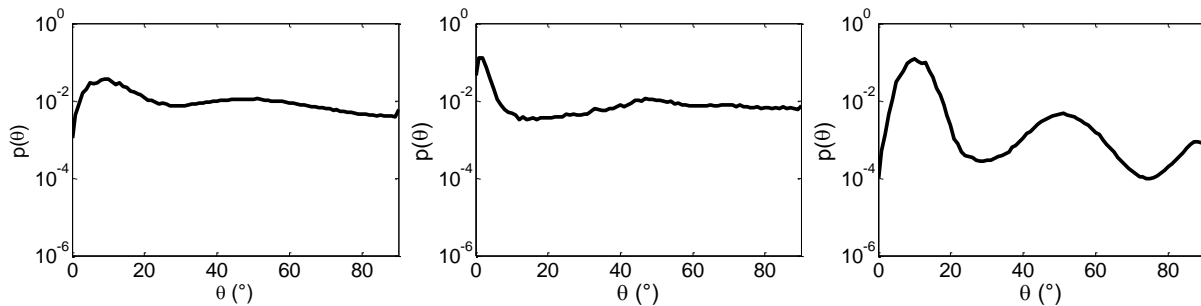


Slika 10.233 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

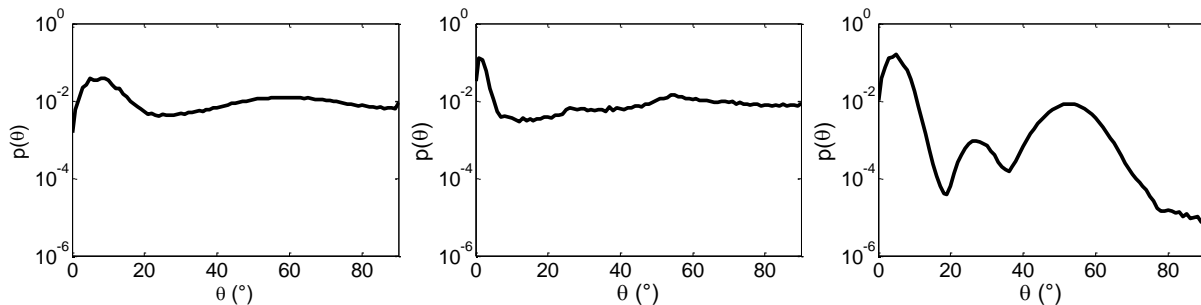
P6.7 Zgrada Zavoda za fiziku (Kraljice Marije 16)



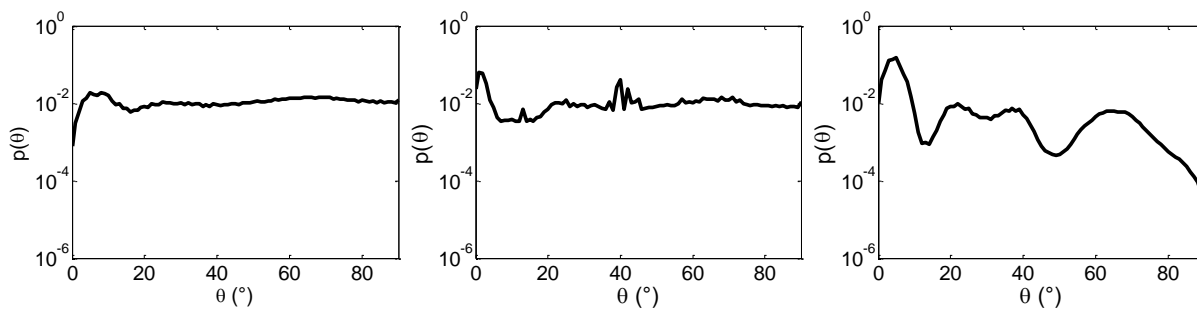
Slika 10.234 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



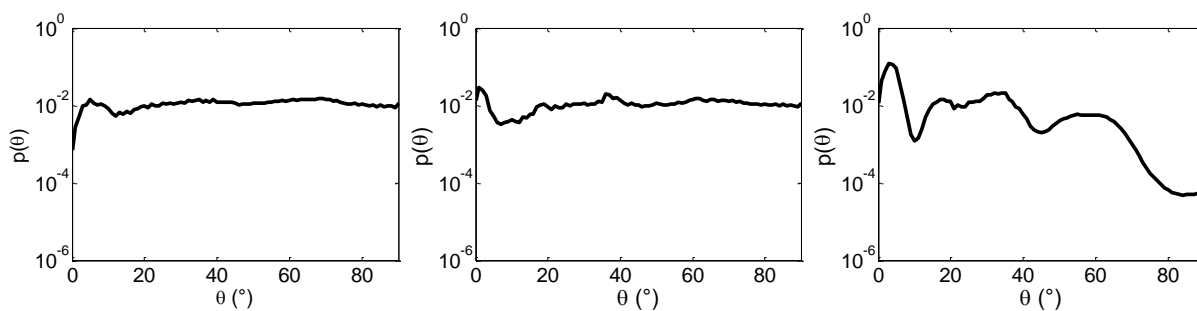
Slika 10.235 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



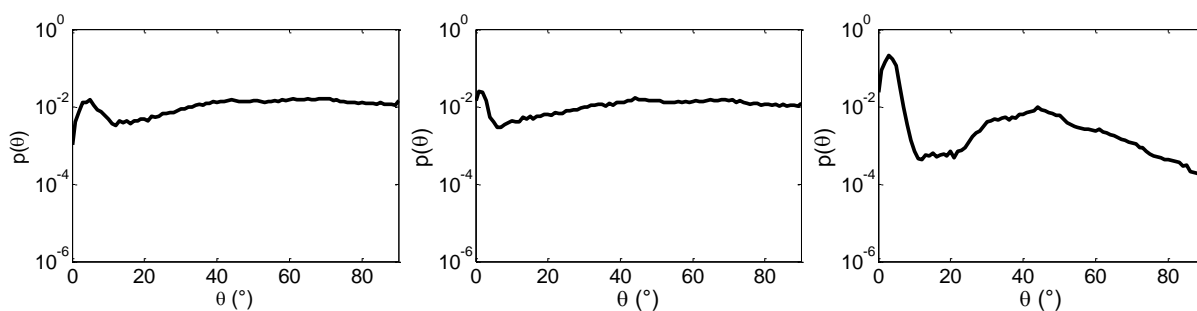
Slika 10.236 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



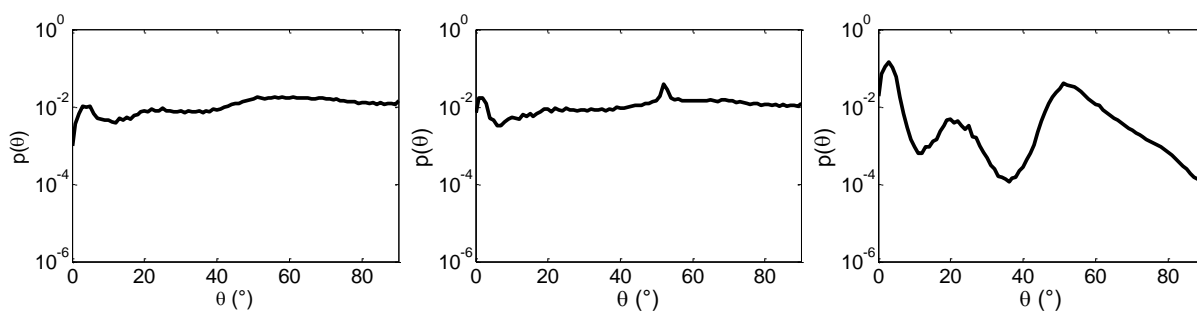
Slika 10.237 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



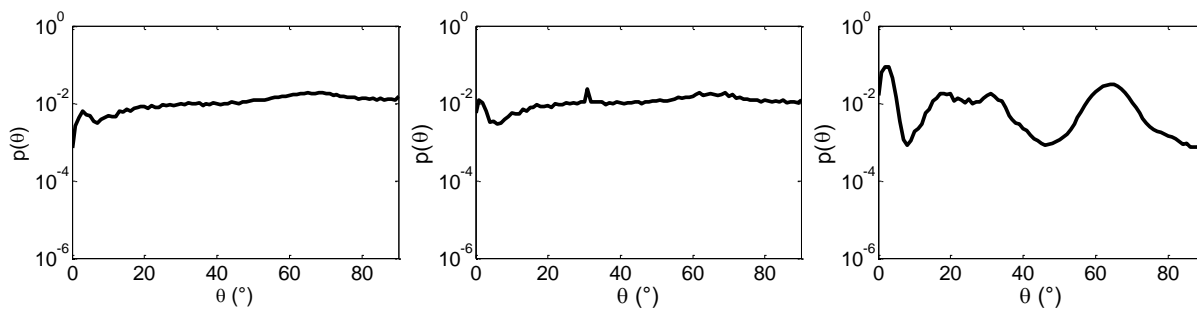
Slika 10.238 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



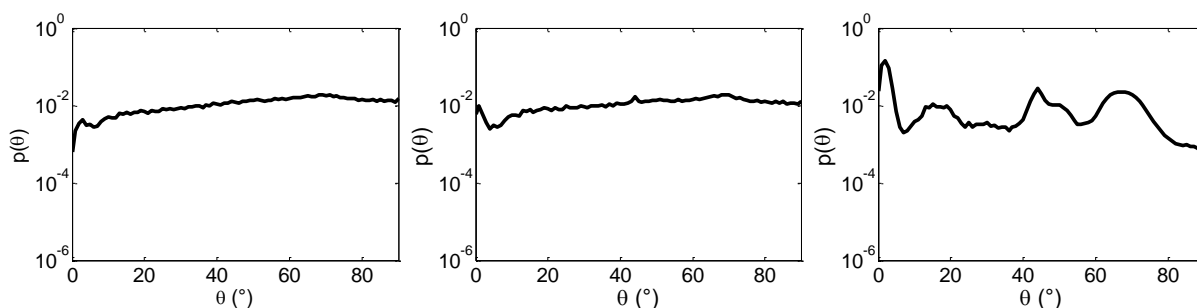
Slika 10.239 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



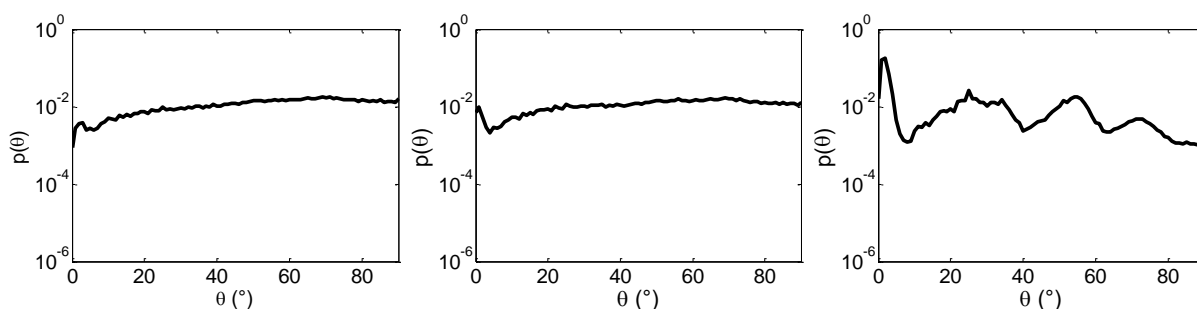
Slika 10.240 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.241 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz

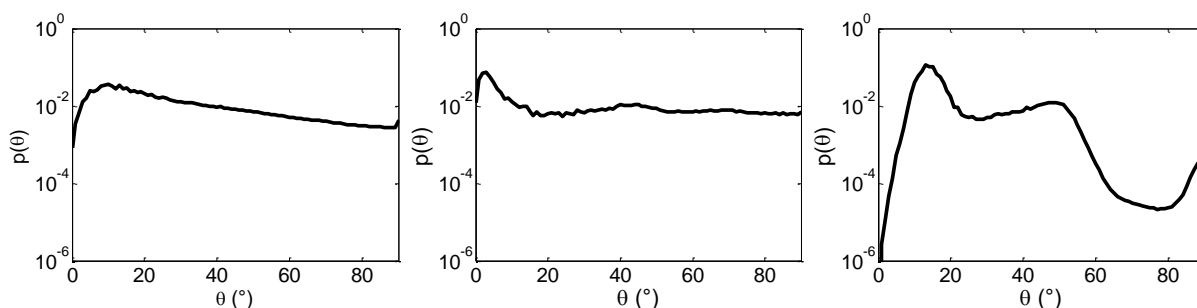


Slika 10.242 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz

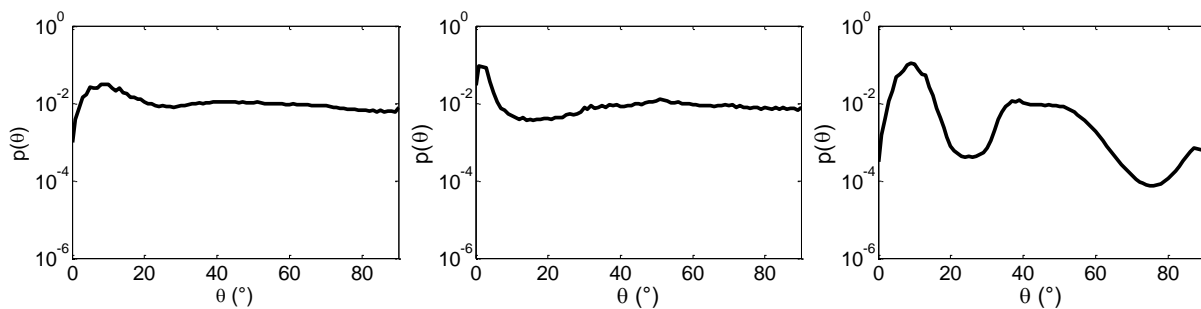


Slika 10.243 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

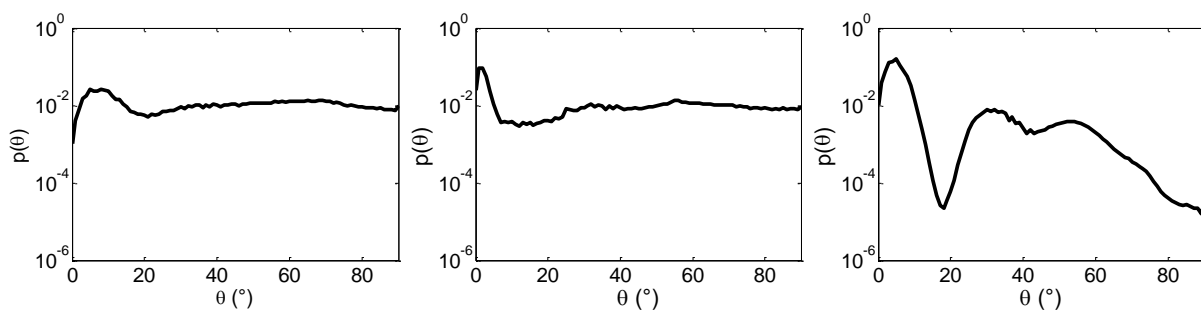
P6.8 Zgrada Zavoda za fiziku (Kraljice Marije 16) – visina 2



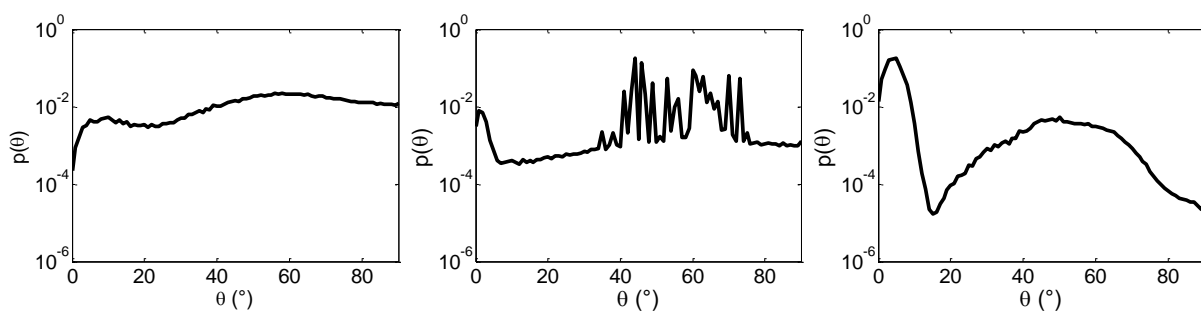
Slika 10.244 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



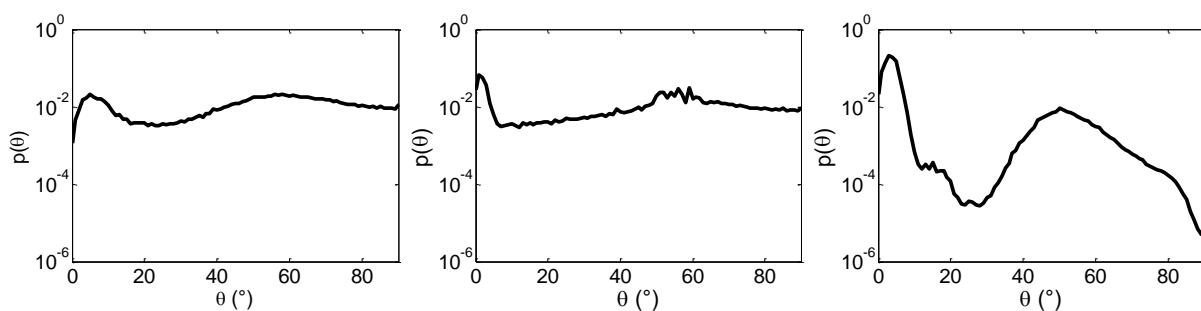
Slika 10.245 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



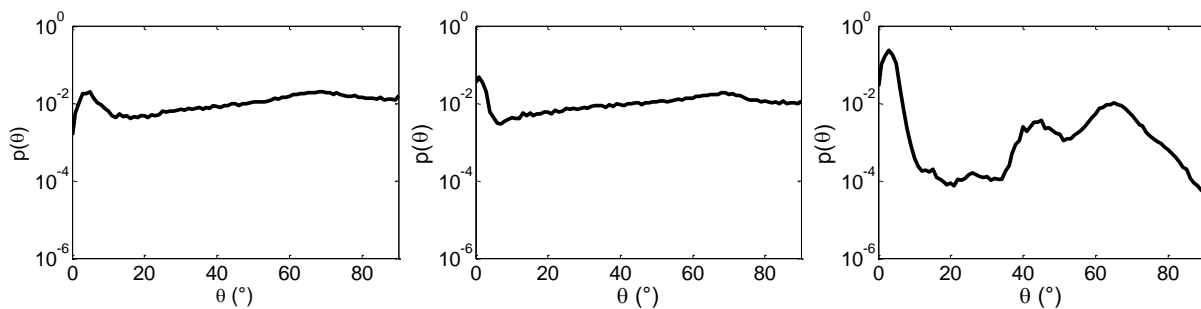
Slika 10.246 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



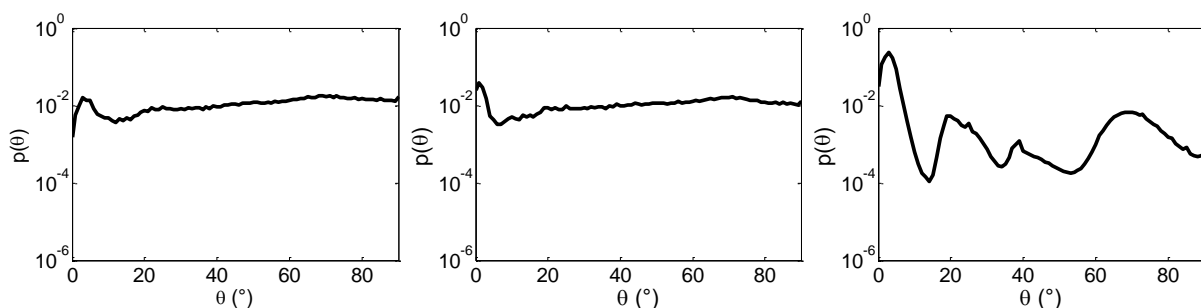
Slika 10.247 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



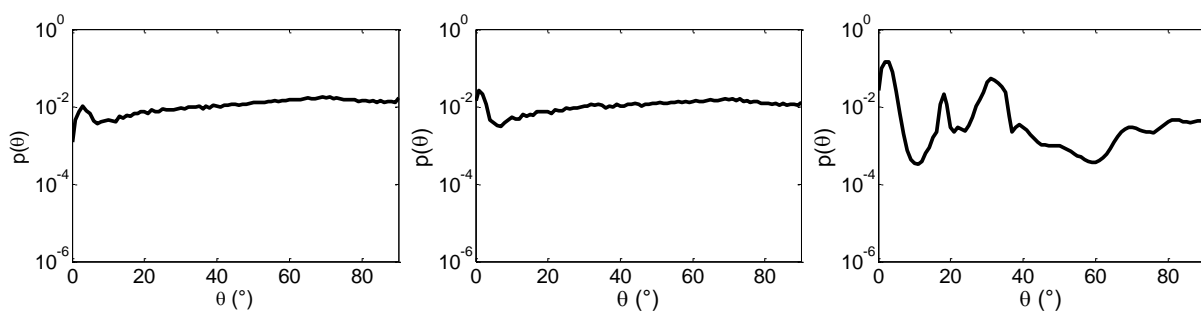
Slika 10.248 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



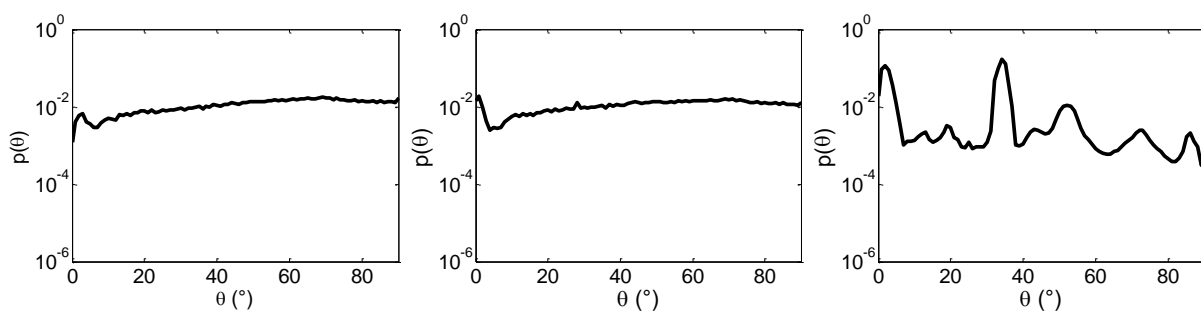
Slika 10.249 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



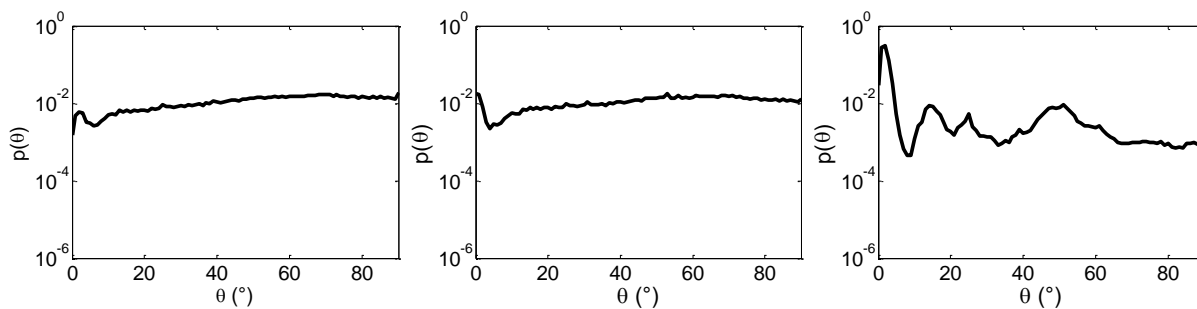
Slika 10.250 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.251 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz

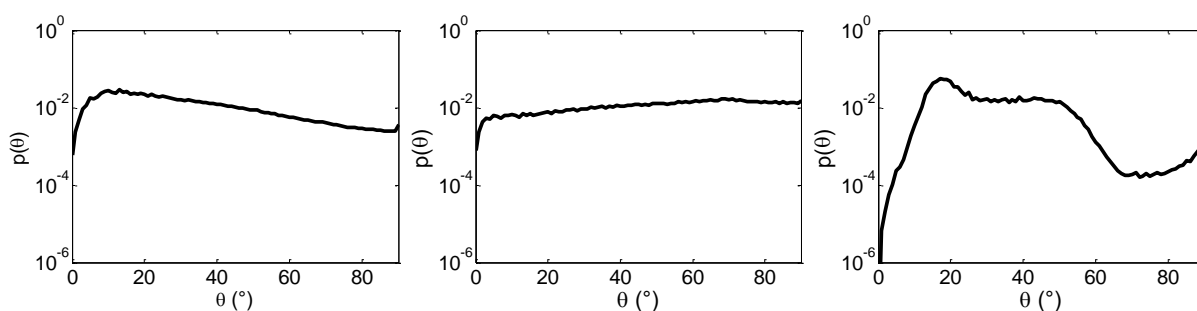


Slika 10.252 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz

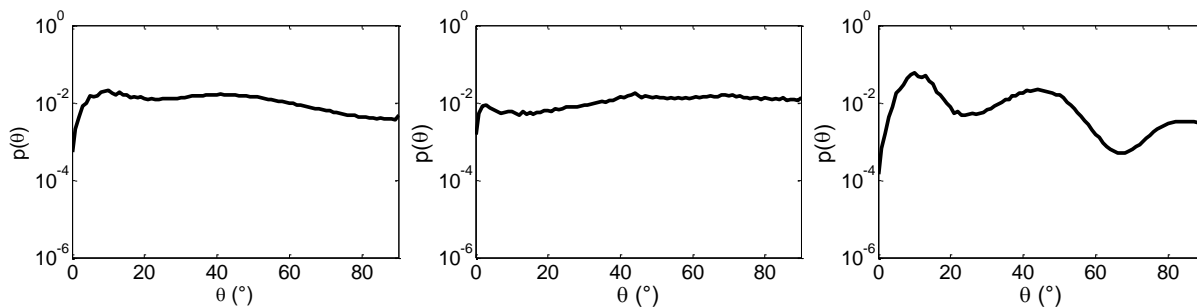


Slika 10.253 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

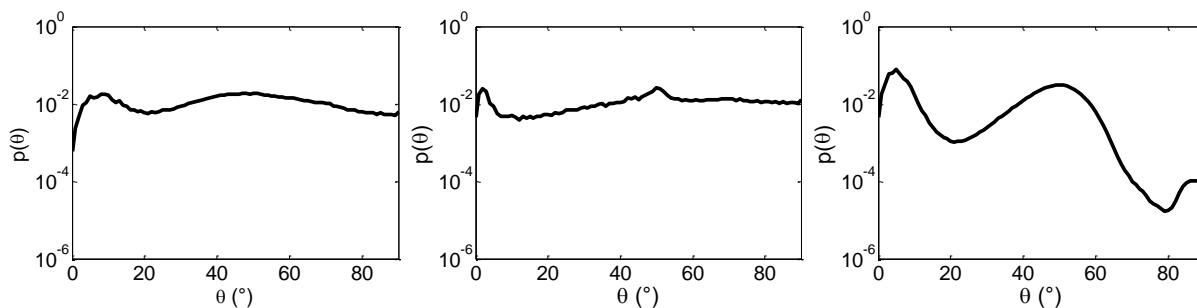
P6.9 Zgrada Zavoda za fiziku (Ruzveltova 1a)



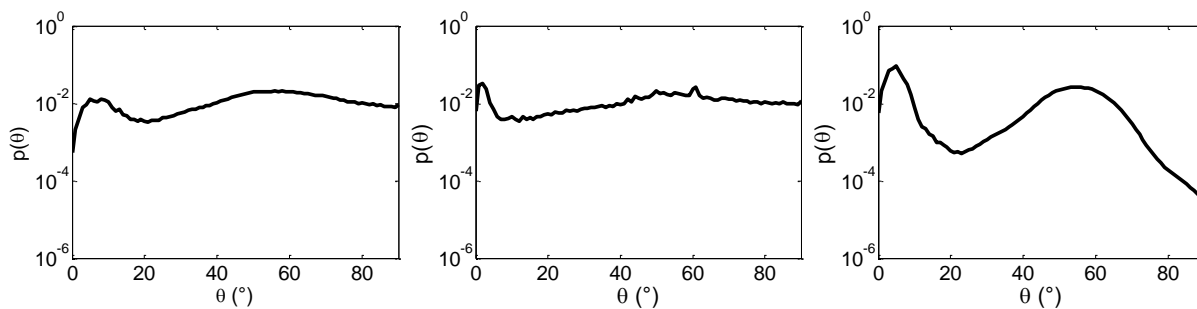
Slika 10.254 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



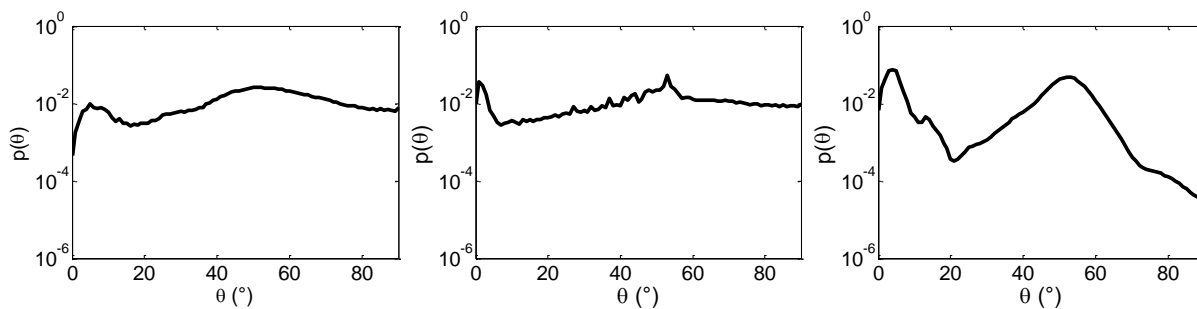
Slika 10.255 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



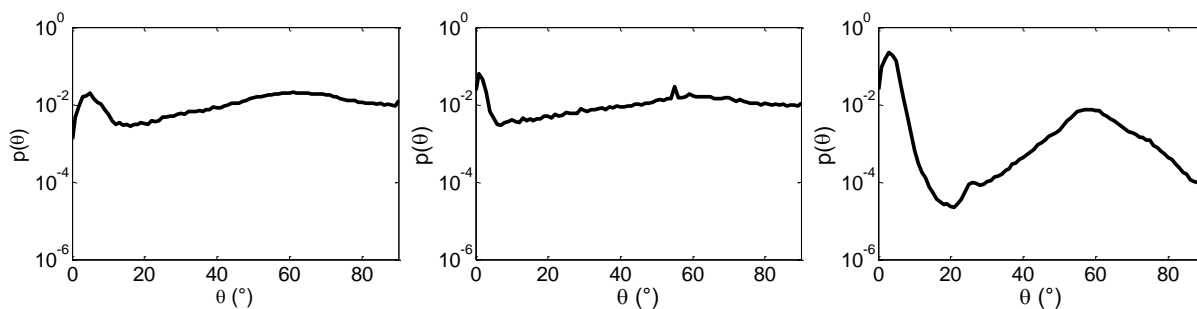
Slika 10.256 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



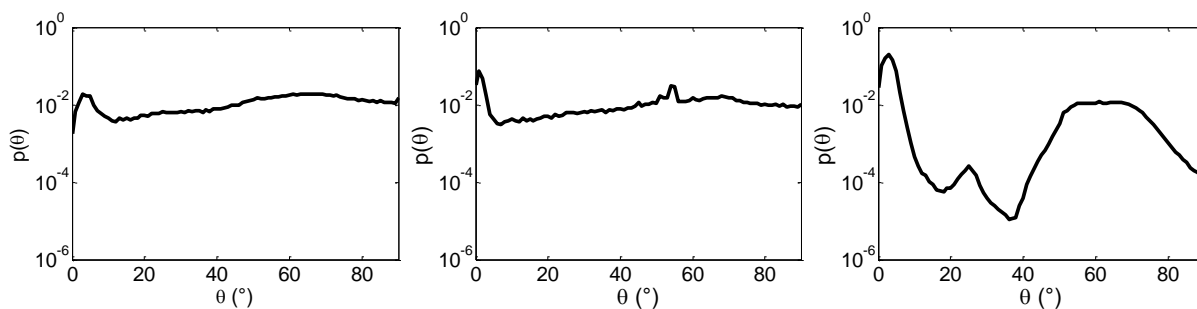
Slika 10.257 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



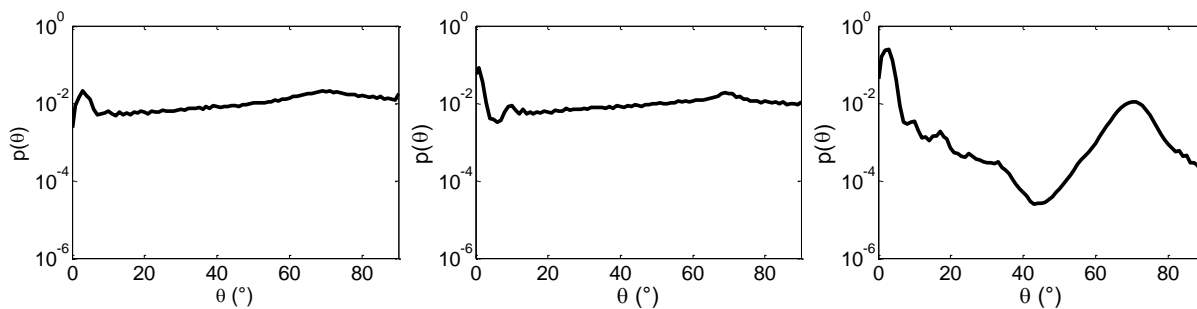
Slika 10.258 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



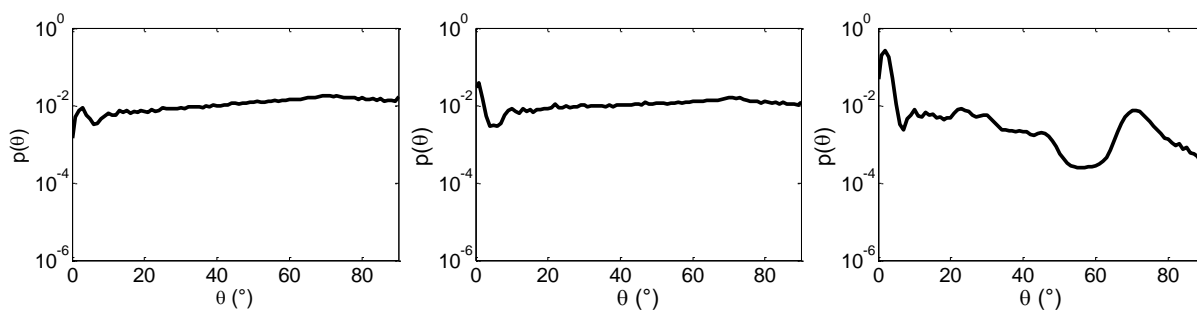
Slika 10.259 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



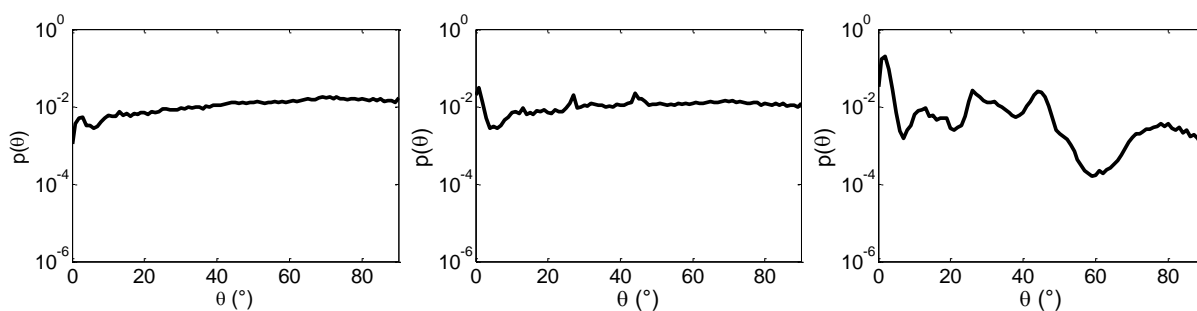
Slika 10.260 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.261 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz

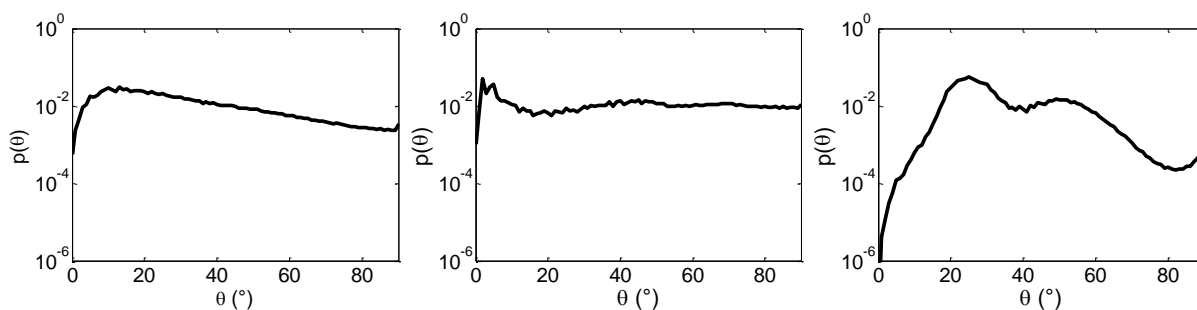


Slika 10.262 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz

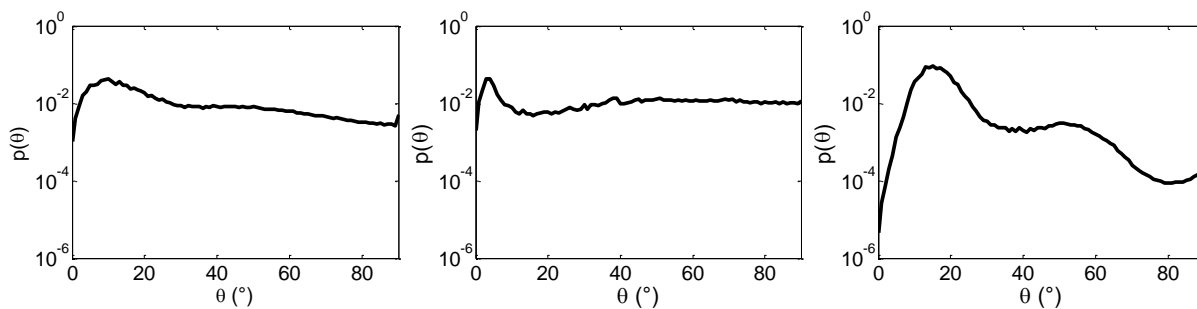


Slika 10.263 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

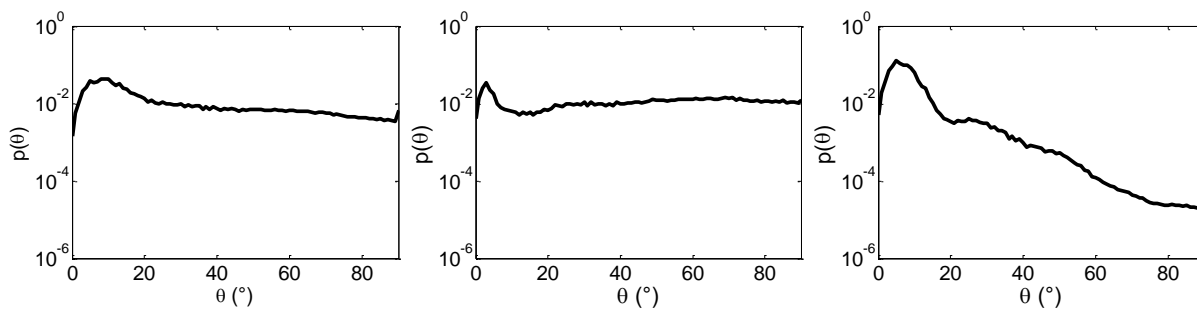
P6.10 Zgrada Ilije Garašanina 19



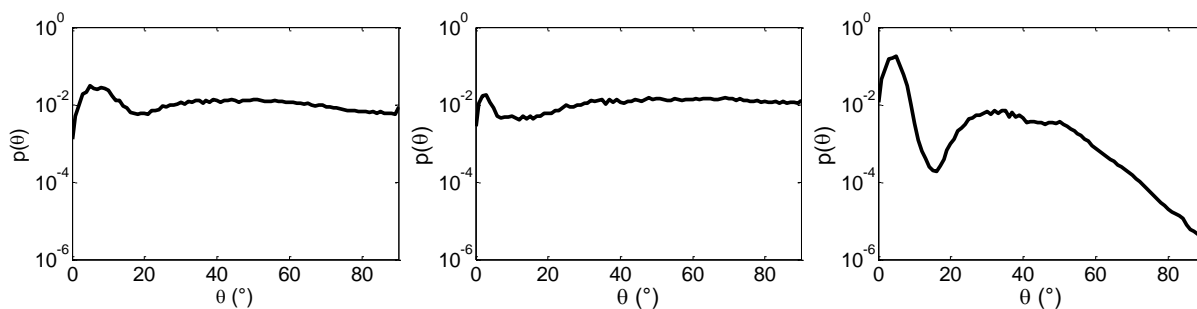
Slika 10.264 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



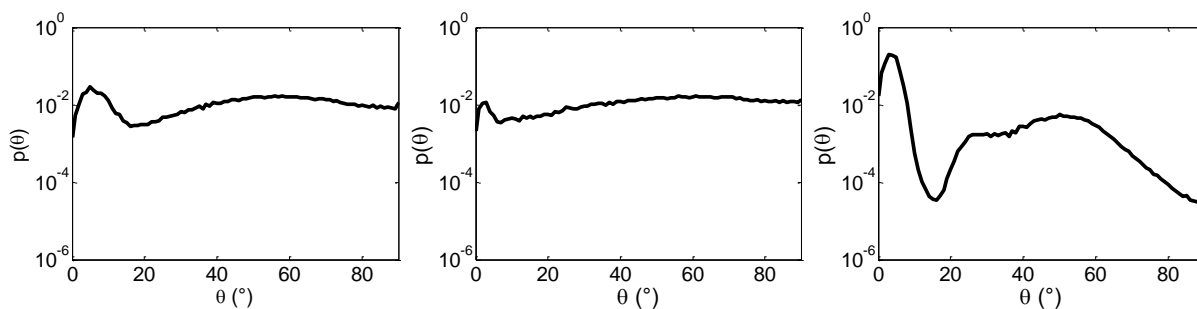
Slika 10.265 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



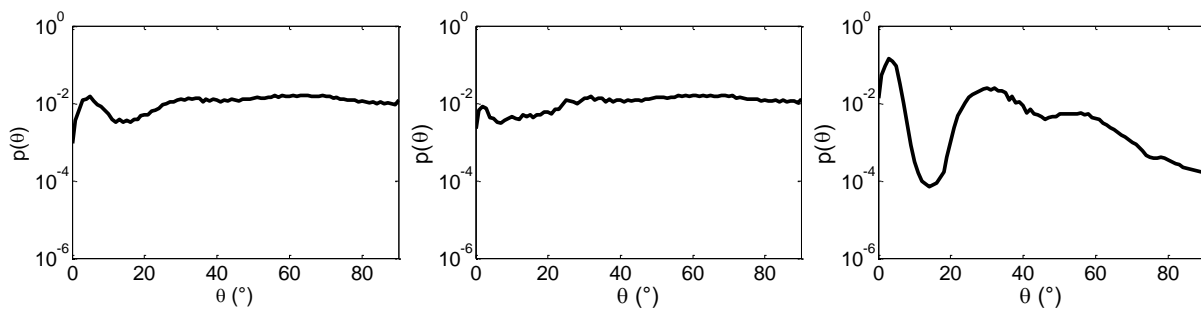
Slika 10.266 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



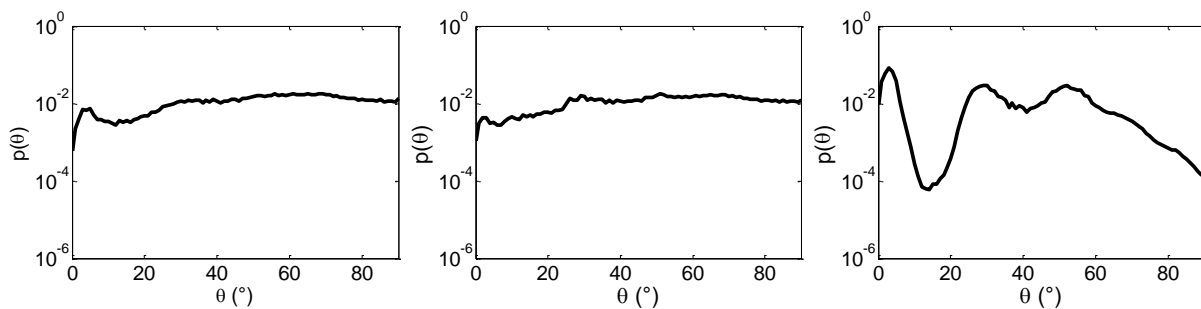
Slika 10.267 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



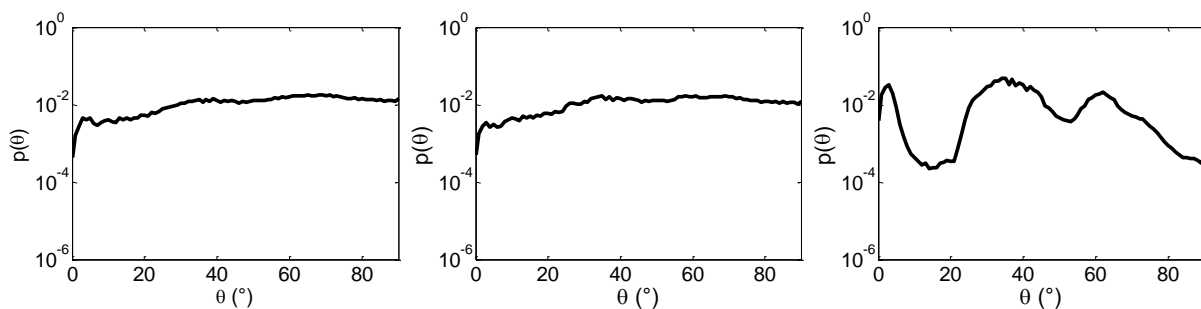
Slika 10.268 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



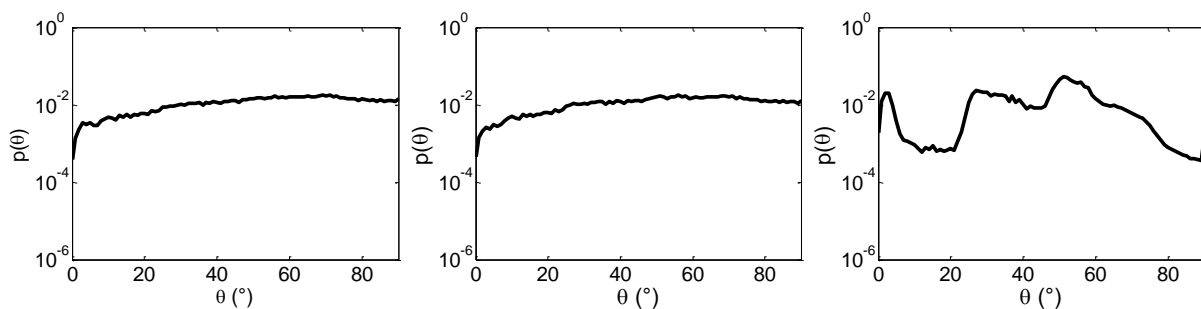
Slika 10.269 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



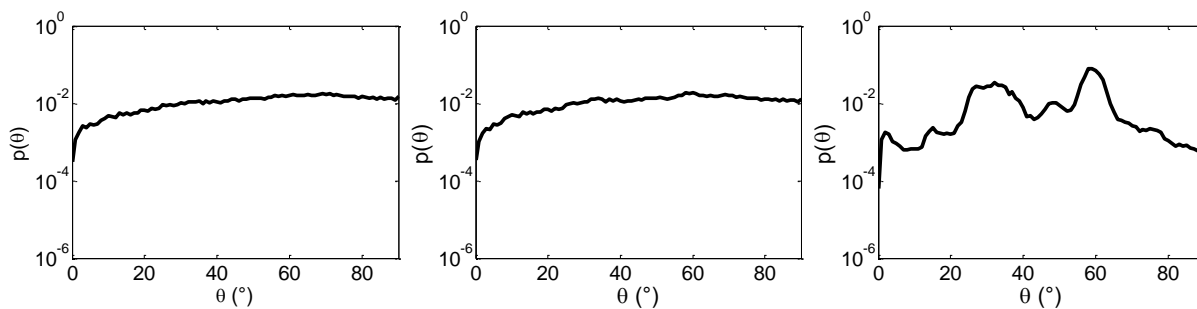
Slika 10.270 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.271 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz

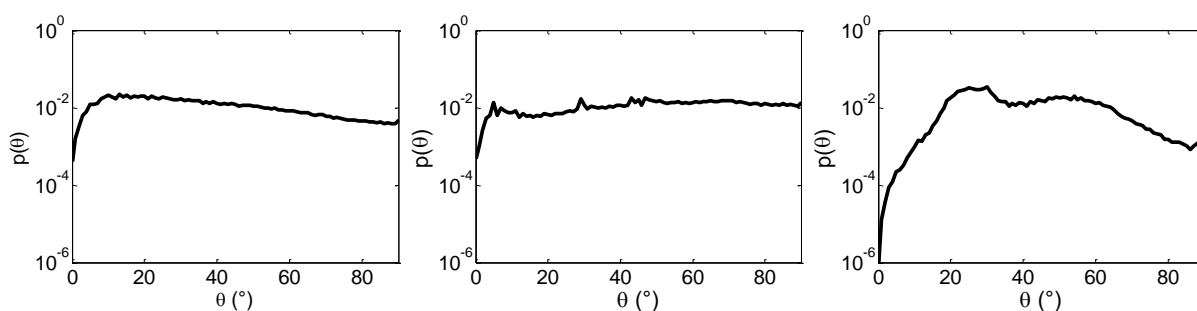


Slika 10.272 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz

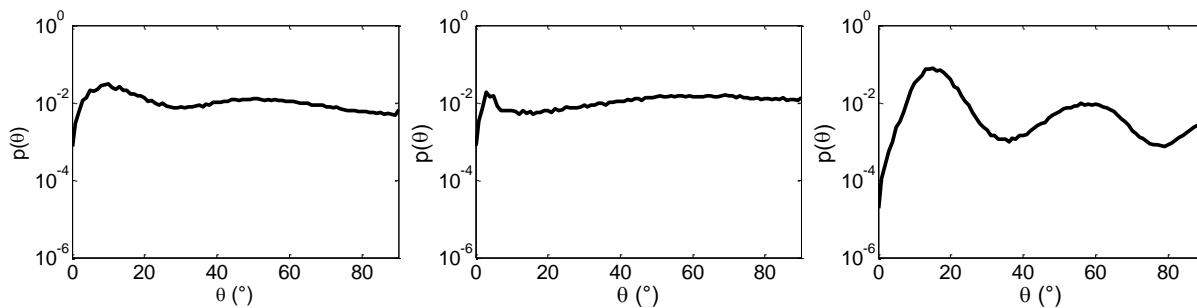


Slika 10.273 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

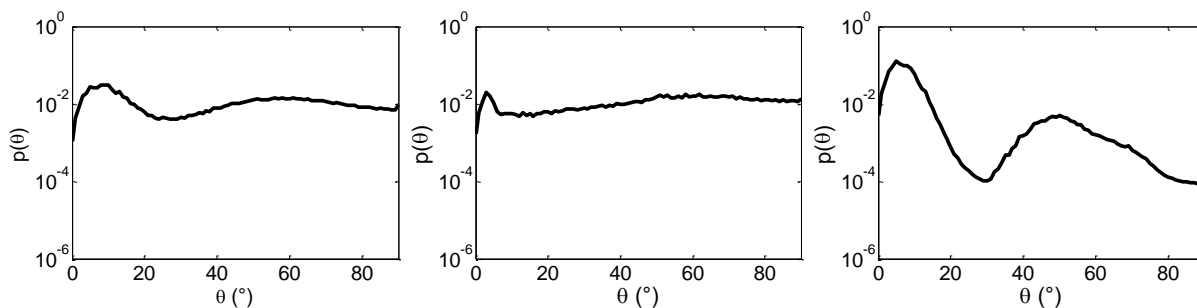
P6.11 Zgrada Ilije Garašanina 19 – visina 2



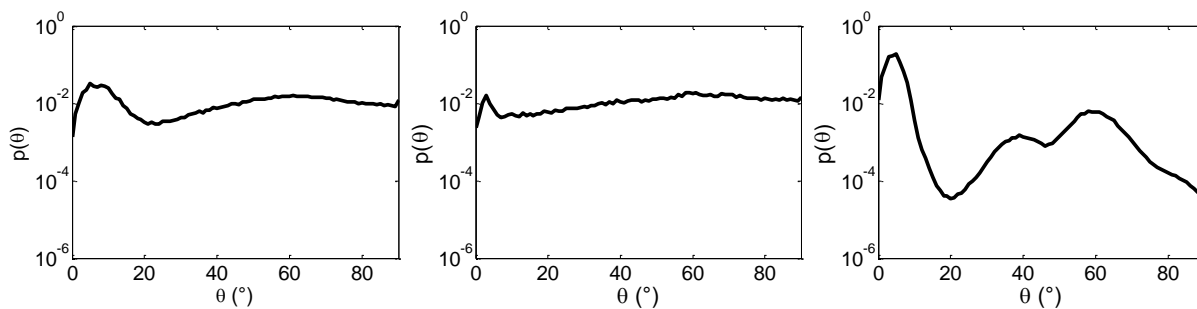
Slika 10.274 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



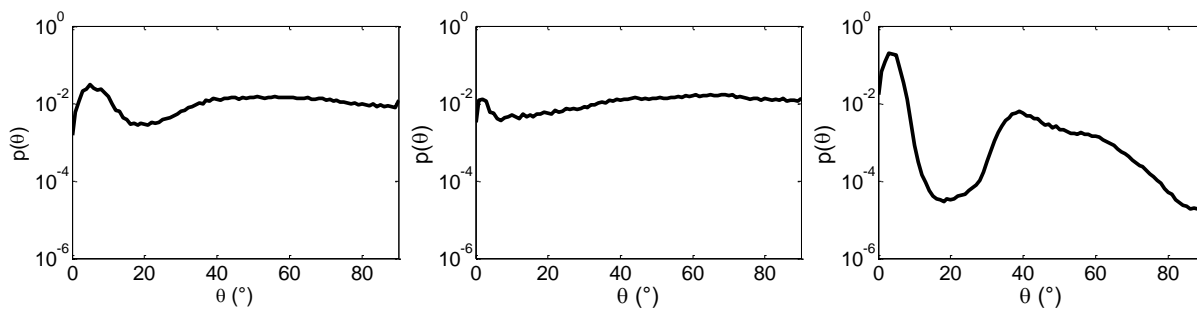
Slika 10.275 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



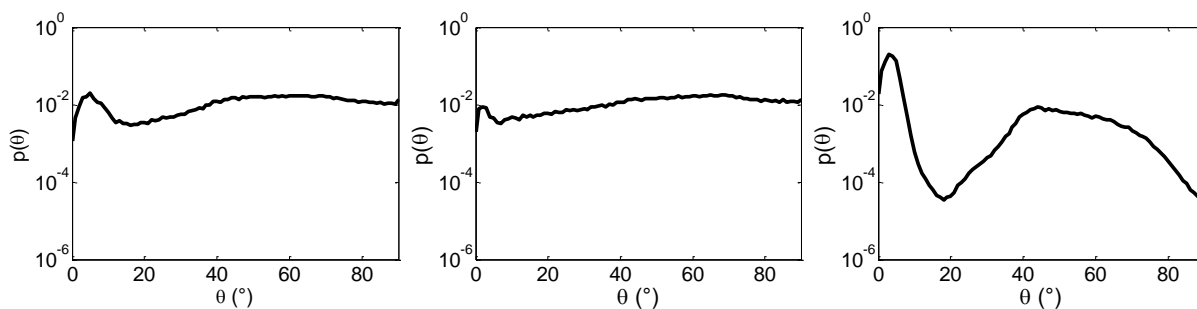
Slika 10.276 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



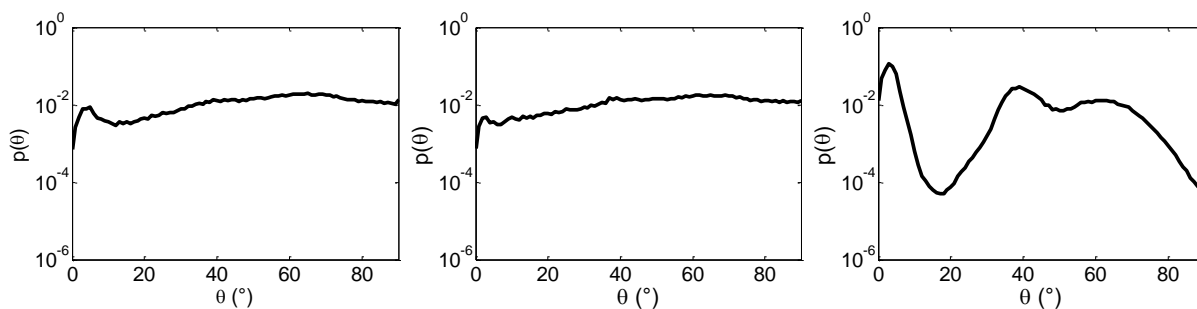
Slika 10.277 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



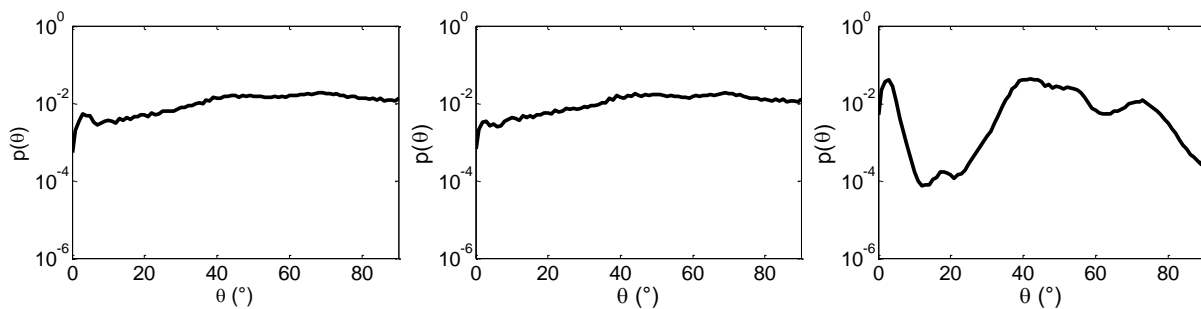
Slika 10.278 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



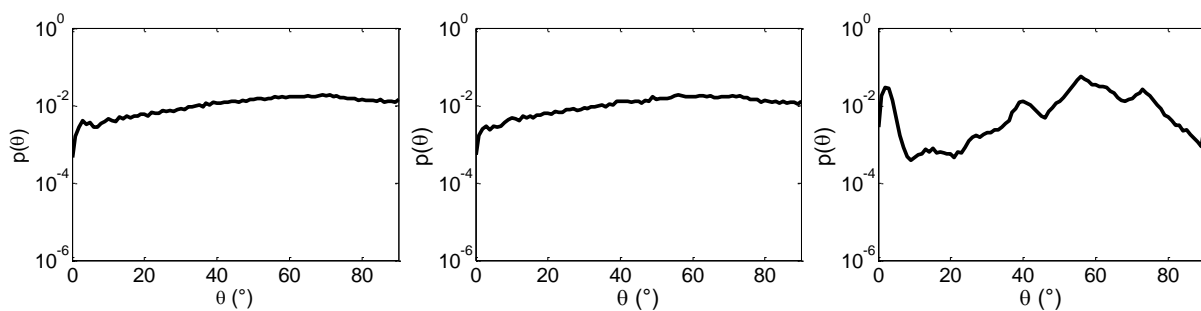
Slika 10.279 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



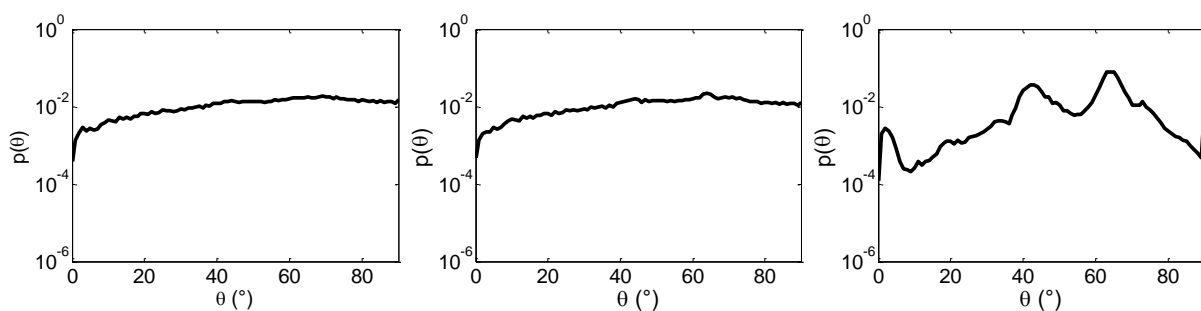
Slika 10.280 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.281 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz

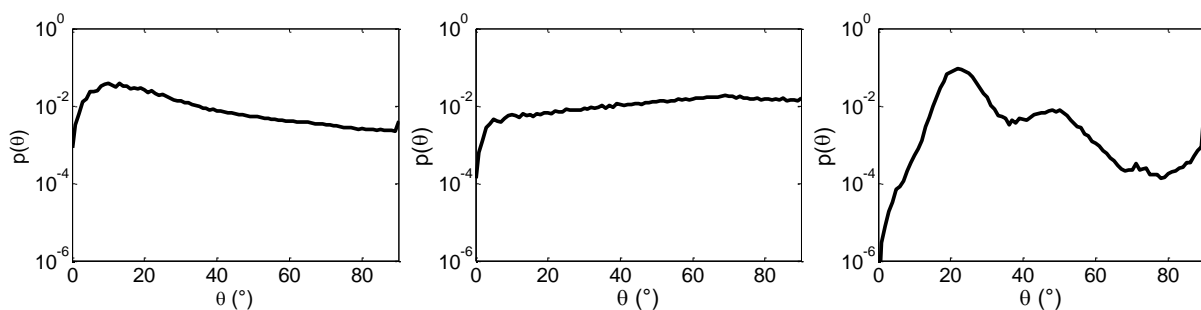


Slika 10.282 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz

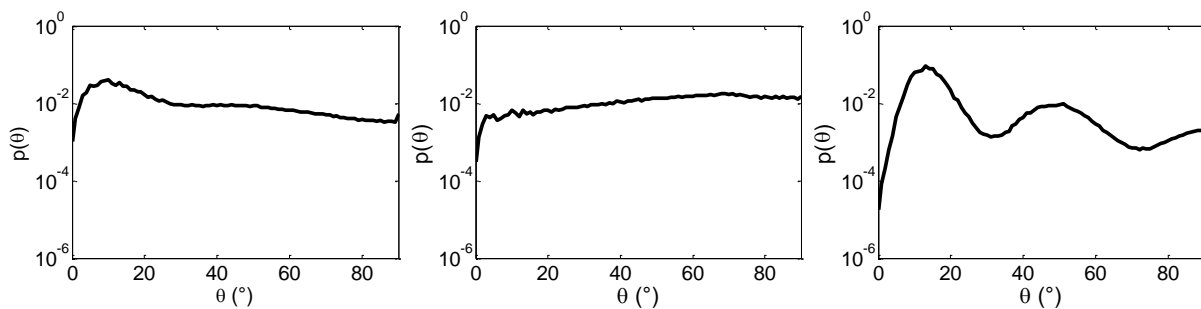


Slika 10.283 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

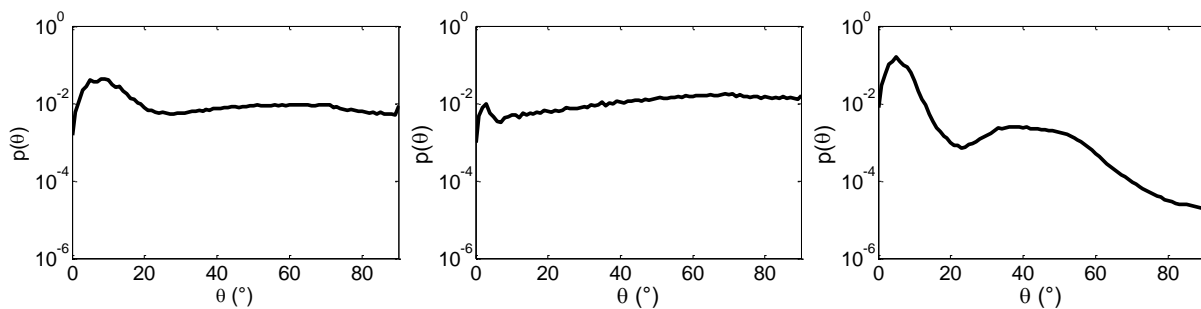
P6.12 Zgrada Tehnološkog fakulteta (Karnegijeva 4)



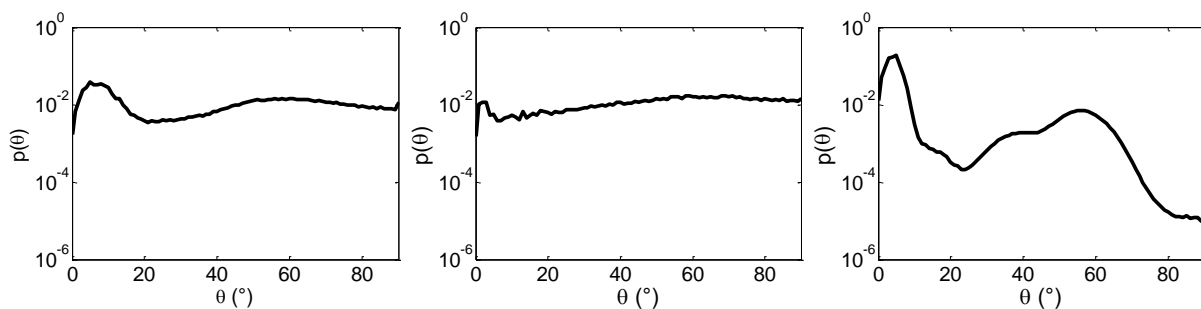
Slika 10.284 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 250 Hz



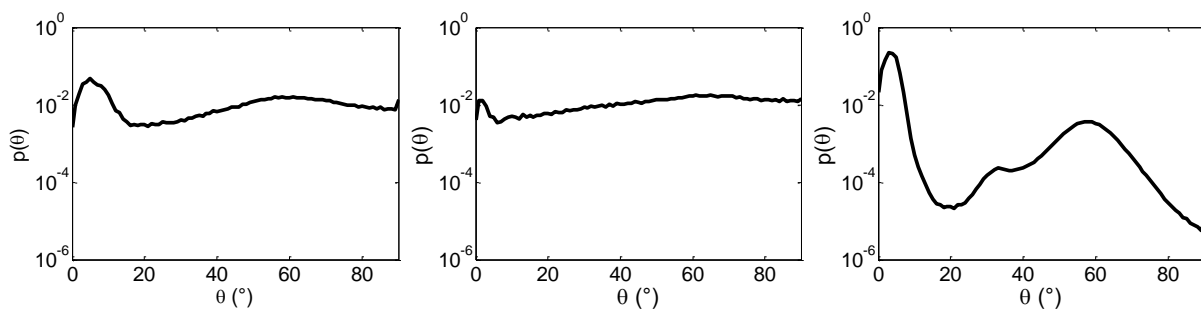
Slika 10.285 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 315 Hz



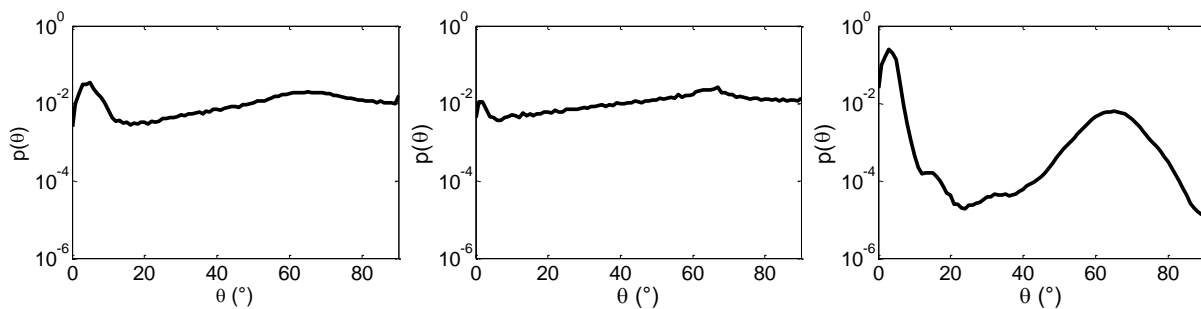
Slika 10.286 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 400 Hz



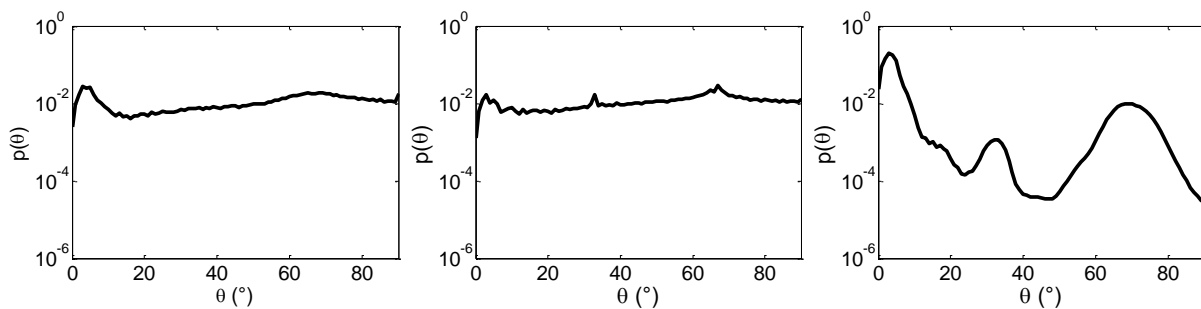
Slika 10.287 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 500 Hz



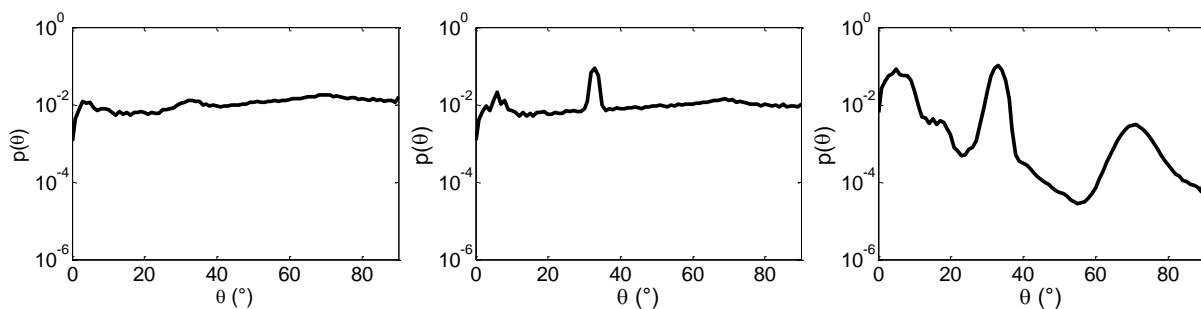
Slika 10.288 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 630 Hz



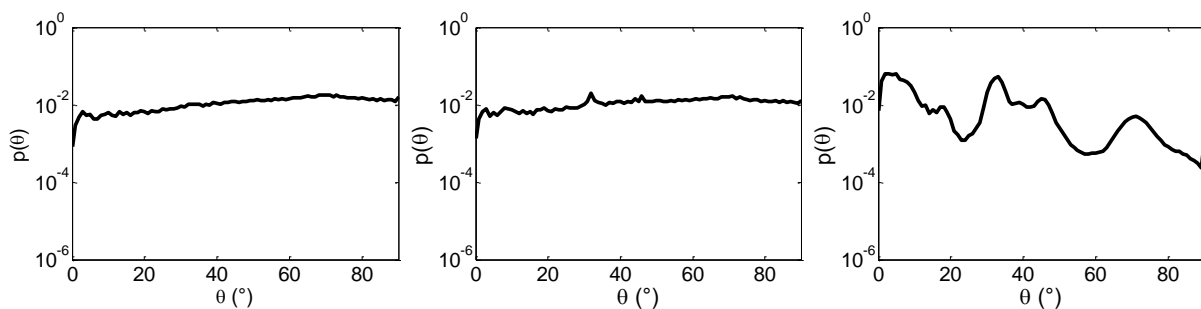
Slika 10.289 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 800 Hz



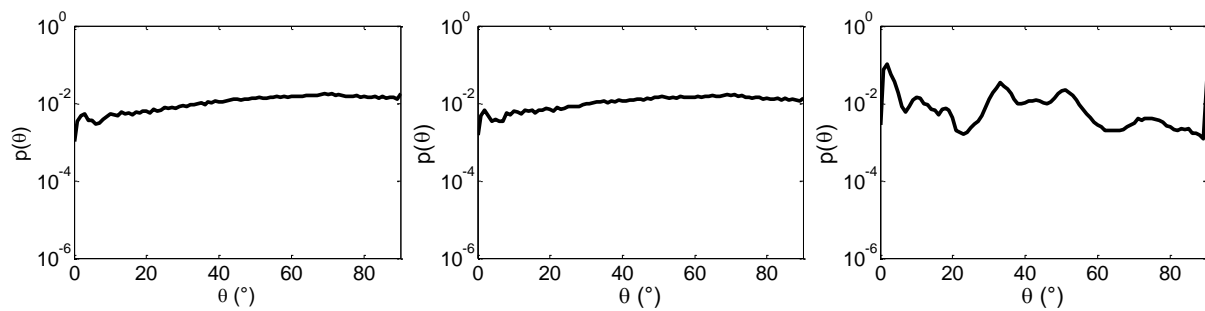
Slika 10.290 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1000 Hz



Slika 10.291 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1250 Hz



Slika 10.292 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 1600 Hz



Slika 10.293 Raspodele dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za tercu 2000 Hz

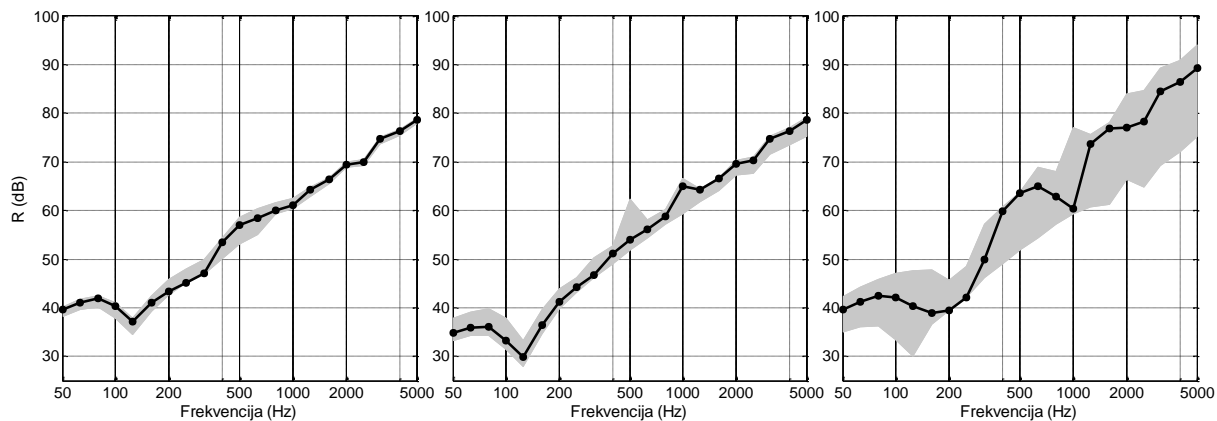
P.7 Konstante građevinskih materijala

Tabela 10.3 Konstante građevinskih materijala

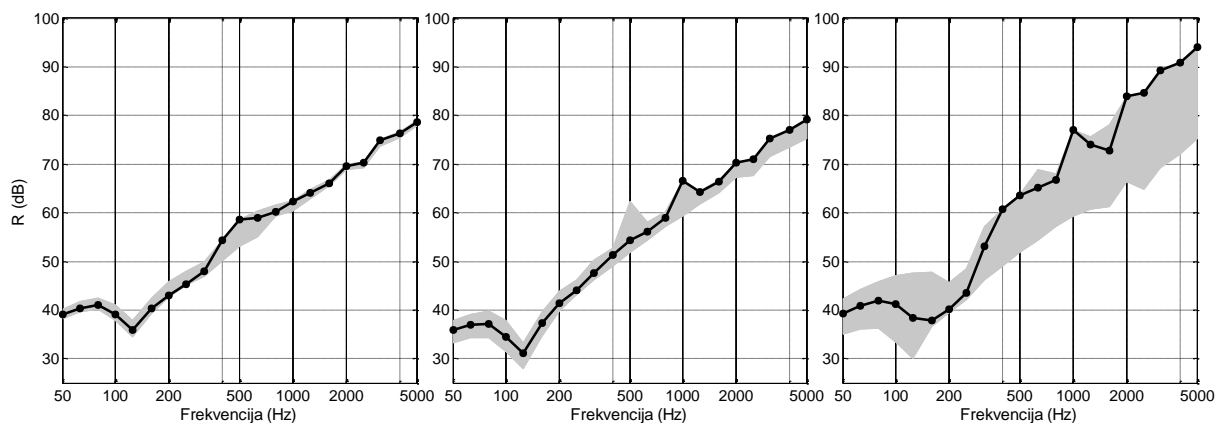
Materijal	Gustina ρ [g/cm ³]	Jangov moduo E [GPa]	Brzina longitudinalnih talasa c_L [km/s]	Faktor prigušenja $\eta_{int} \times 100$
Teški beton	2 – 2.4	25 – 35	3.4	0.7
Laki beton	1.3 – 1.6	3.8	1.7	1.2
Porozni beton	0.6 – 0.8	2	1.7	1.5
Azbestni beton	2	28	3.7	1.2
Opeka	1.8 – 2	16 – 20	2.5	0.6
Gips	1 – 1.2	3.1 – 3.4	2.4	0.007
Gips-karton ploče	1	4	-	0.6
Krečni malter	1.7	2.5 – 3	1.6	3
Asfalt	1.8 – 2.3	16	2.5	20
Staklo	2.5	18	4.9	0.3 – 0.6
Hrastovina	0.7 – 1	6	3	1
Čamovina	0.4 – 0.7	3	2.5	0.8
Šper-ploča	0.6 – 0.7	3 – 3.5	3	2
Iverica	0.6 – 0.7	2.2	2.7	1
Lesonit	0.8	2.3	-	1
Pleksiglas	1.2	5.6	2.2	3
Polipropilen	1.1	3	1.7	10
Aluminijum	2.7	72	5.2	0.15
Olovo	11.3	17	1.3	10
Čelik	7.8	170	5.1	0.05 – 0.07
Bakar	8.9	125	3.7	0.2

P.8 Prikaz proračunatih izolacionih moći fasadnih pregrada sa eksperimentalno određenim ugaonim raspodelama

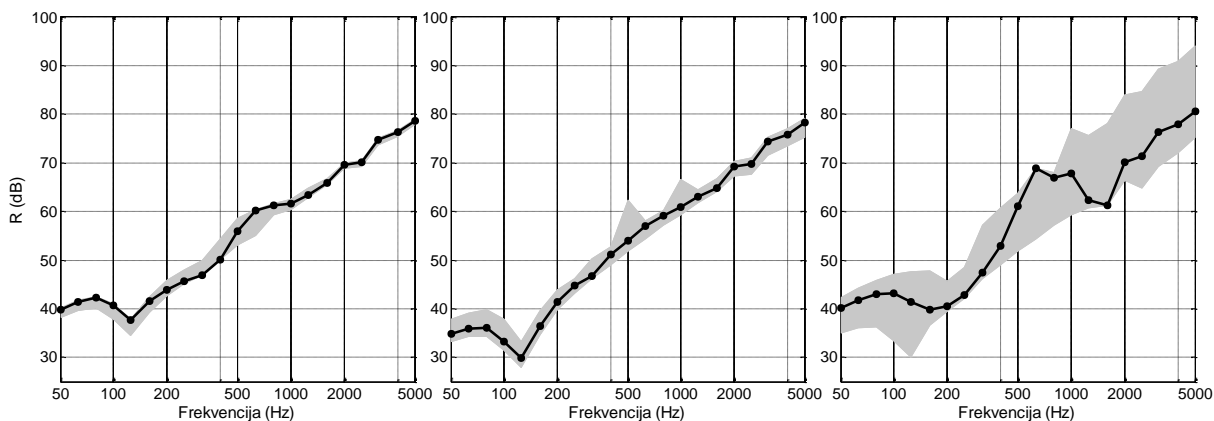
P8.1 Beton 16 cm



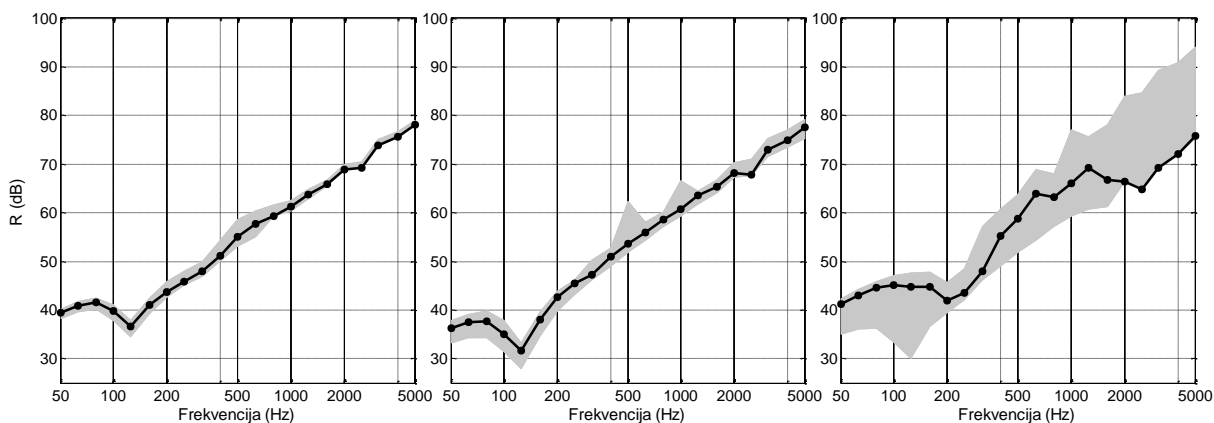
Slika 10.294 Izolacione moći dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada Bit (Cara Nikolaja II 21)



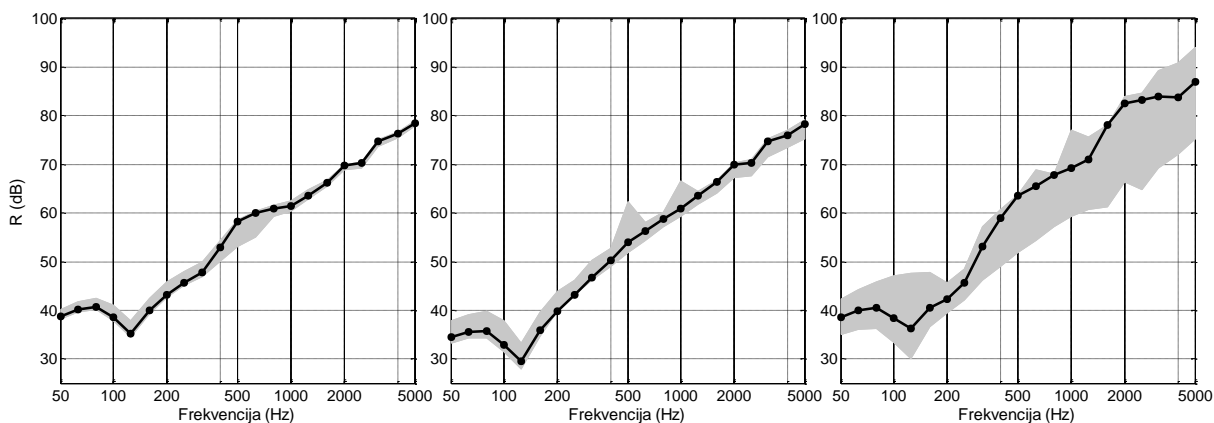
Slika 10.295 Izolacione moći dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada Bit (Cara Nikolaja II 21) – visina 2



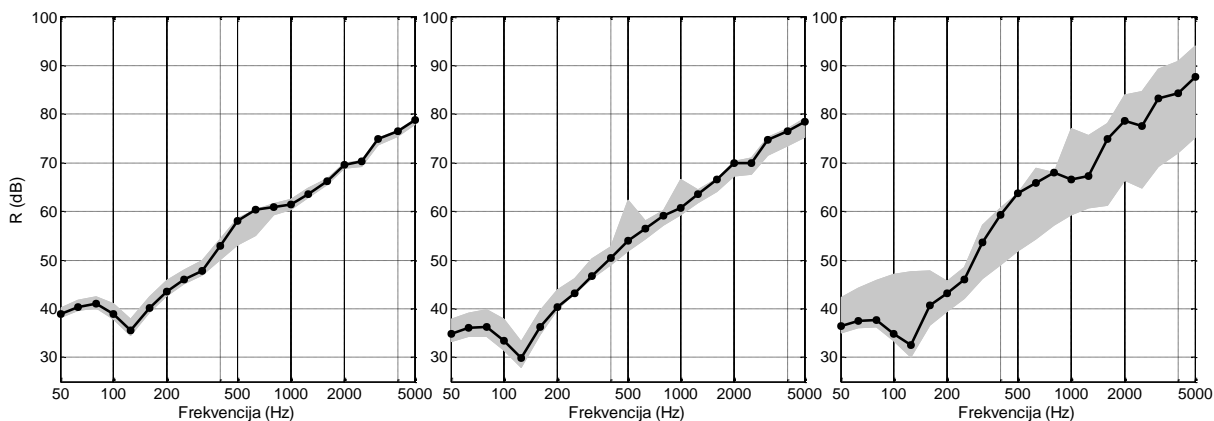
Slika 10.296 Izolacine moci dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada tehničkih fakulteta (Bulevar kralja Aleksandra 73 – bočno)



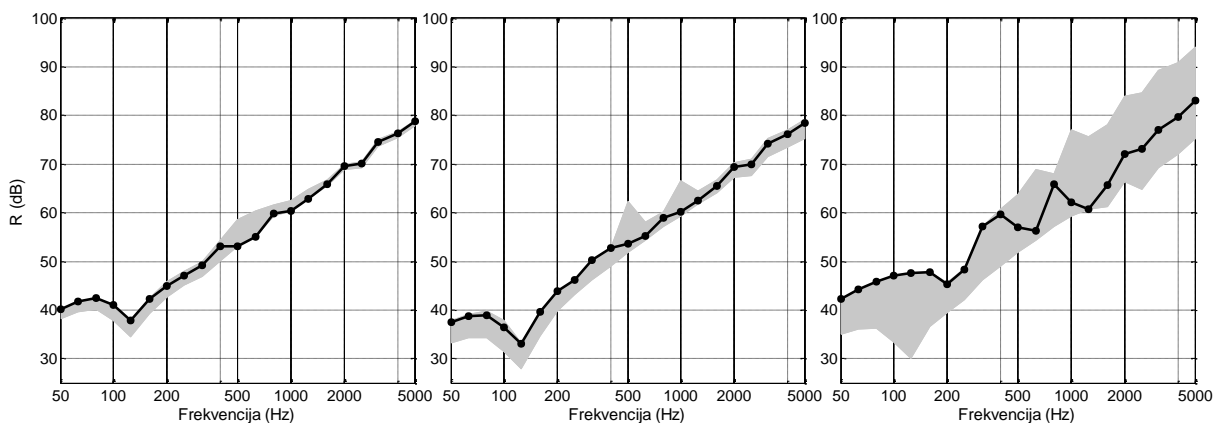
Slika 10.297 Izolacine moci dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada tehničkih fakulteta (Bulevar kralja Aleksandra 73)



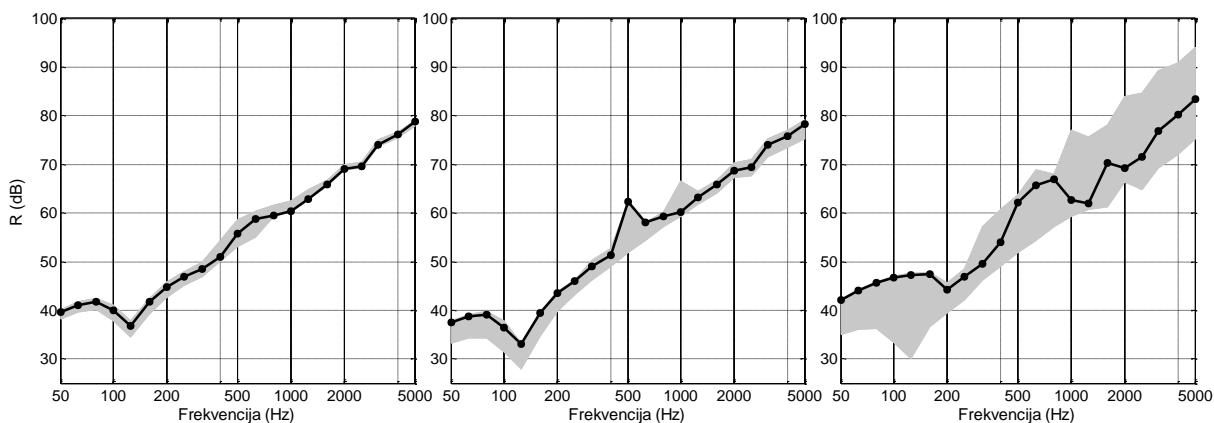
Slika 10.298 Izolacine moci dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada Molerova (Molerova 70)



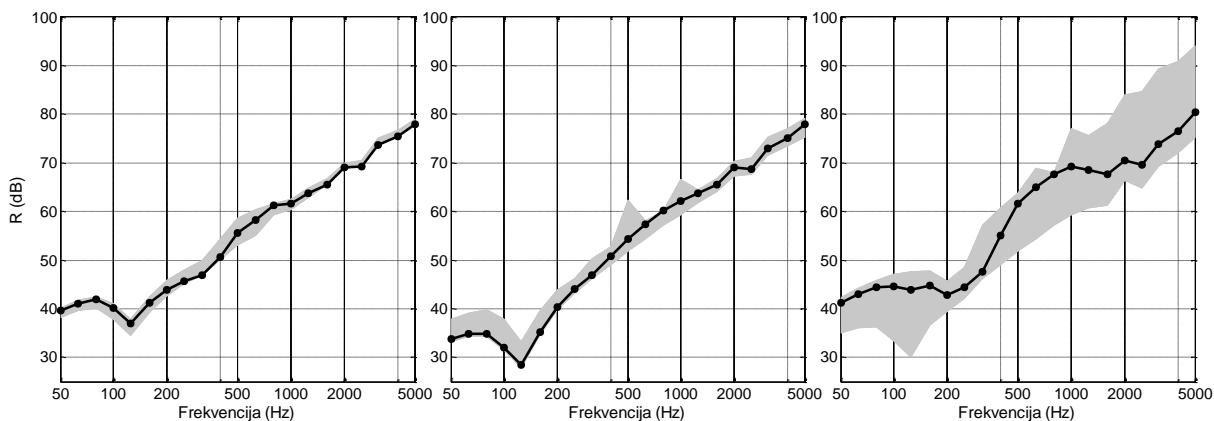
Slika 10.299 Izolacine moci dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada Molerova (Molerova 70) – visina 2



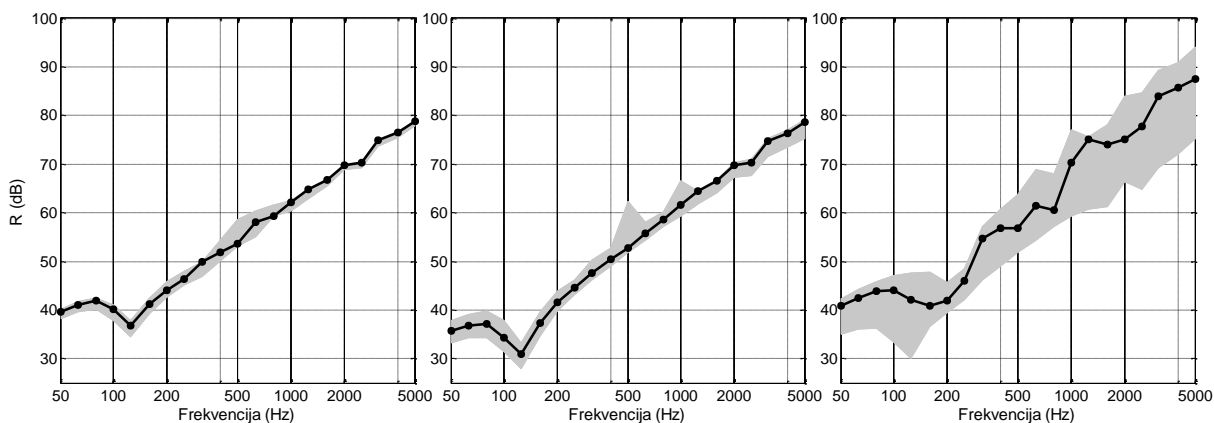
Slika 10.300 Izolacine moci dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada Zavoda za fiziku (Kraljice Marije 16)



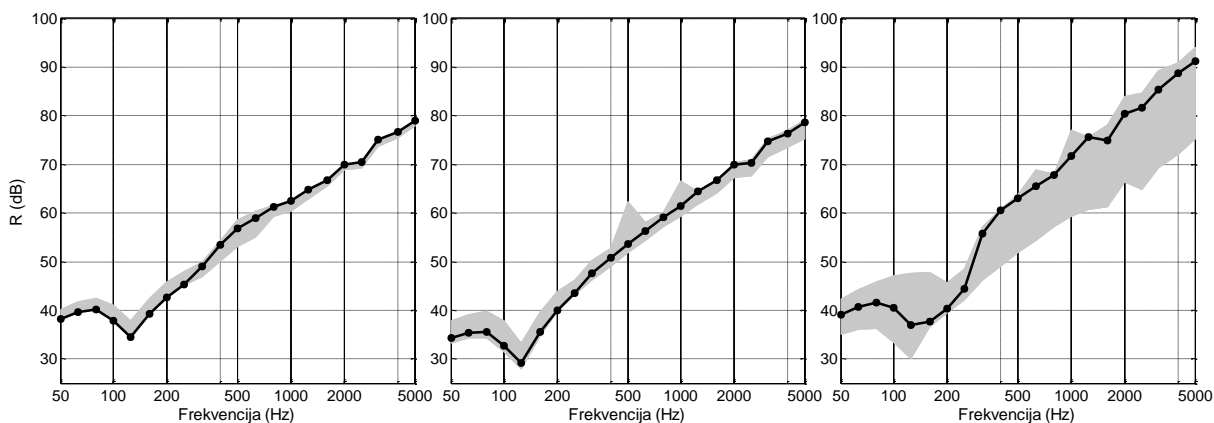
Slika 10.301 Izolacine moci dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada Zavoda za fiziku (Kraljice Marije 16) – visina 2



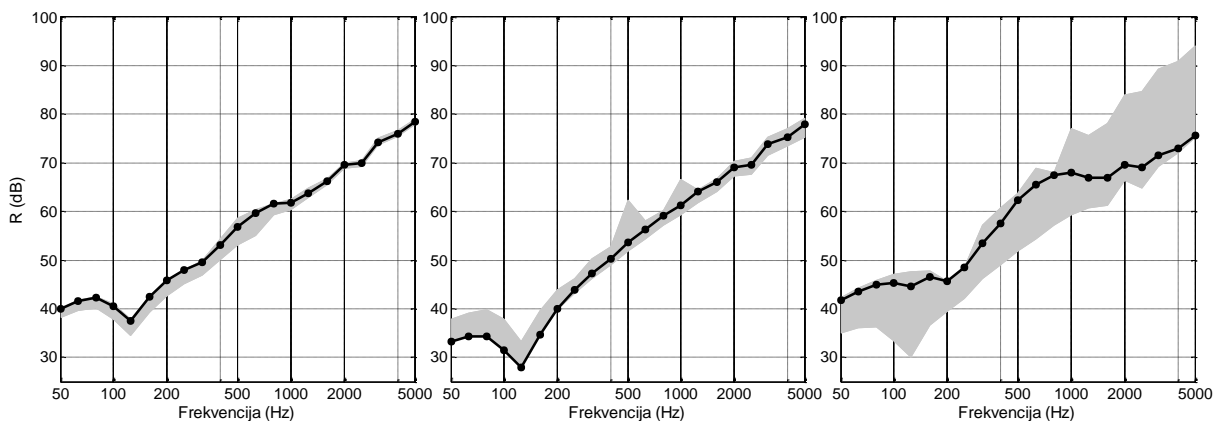
Slika 10.302 Izolacione moci dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada Zavoda za fiziku (Ruzveltova 1a)



Slika 10.303 Izolacione moci dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada Ilije Garašanina 19

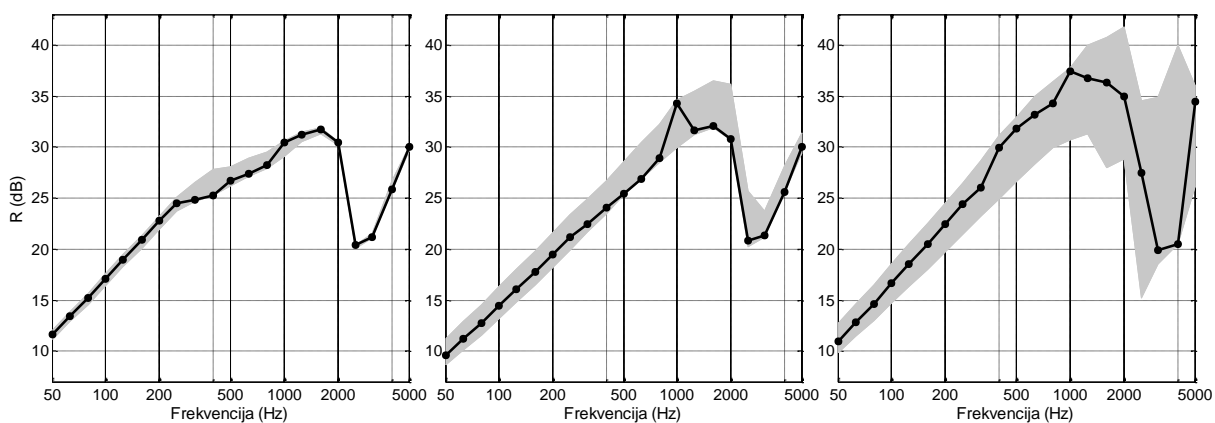


Slika 10.304 Izolacione moci dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada Ilije Garašanina 19 – visina 2

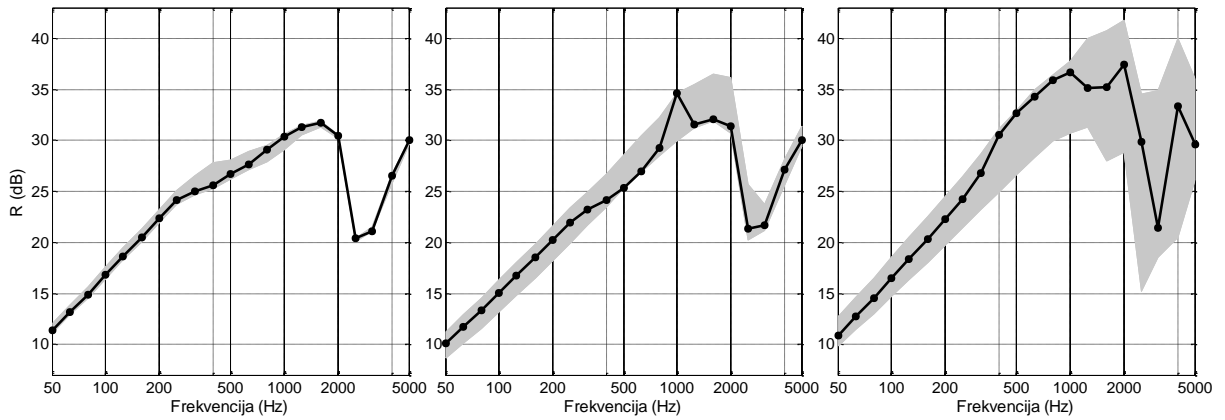


Slika 10.305 Izolacine moci dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada Tehnološkog fakulteta (Karnegijeva 4)

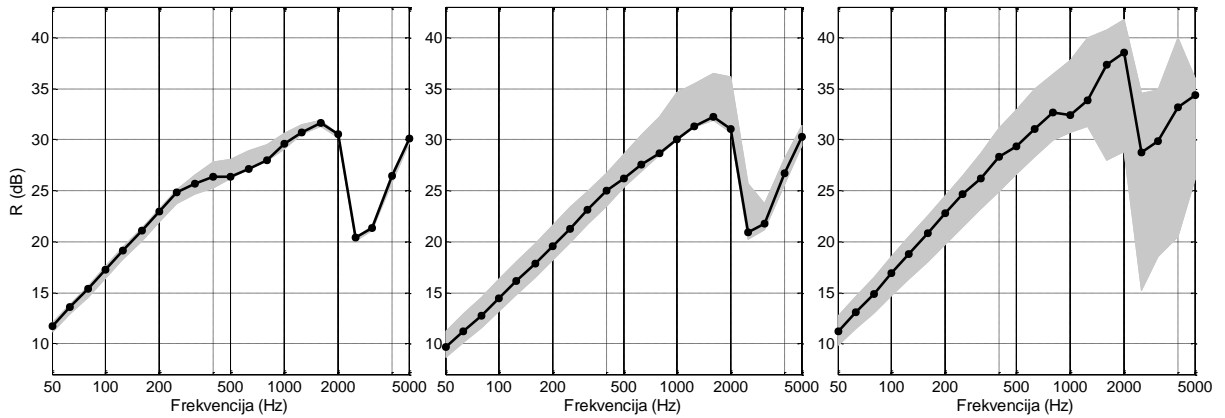
P8.2 Staklo 5 mm



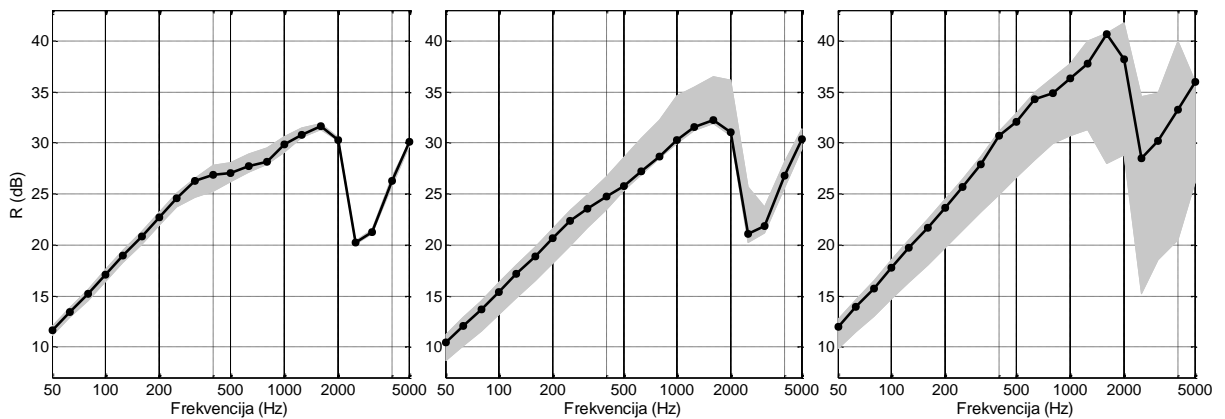
Slika 10.306 Izolacine moci dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada Bit (Cara Nikolaja II 21)



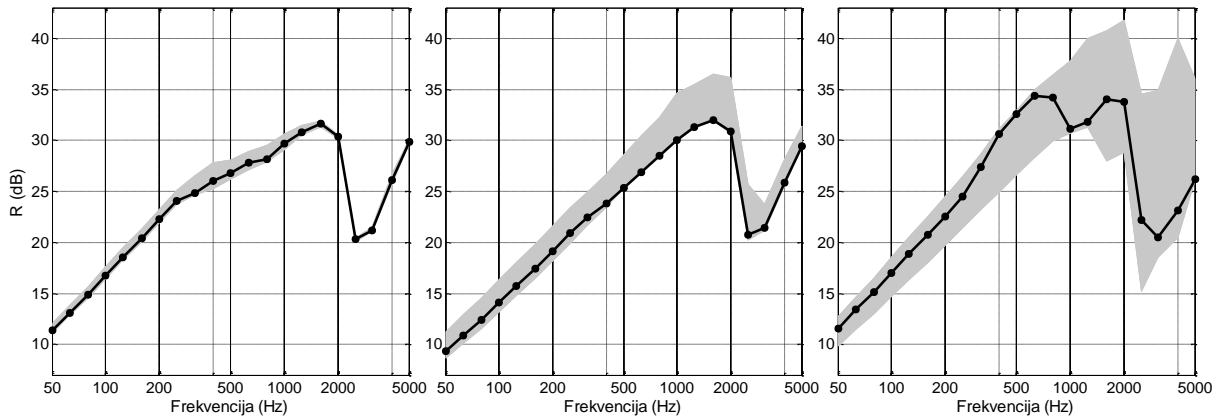
Slika 10.307 Izolacine moci dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada Bit (Cara Nikolaja II 21) – visina 2



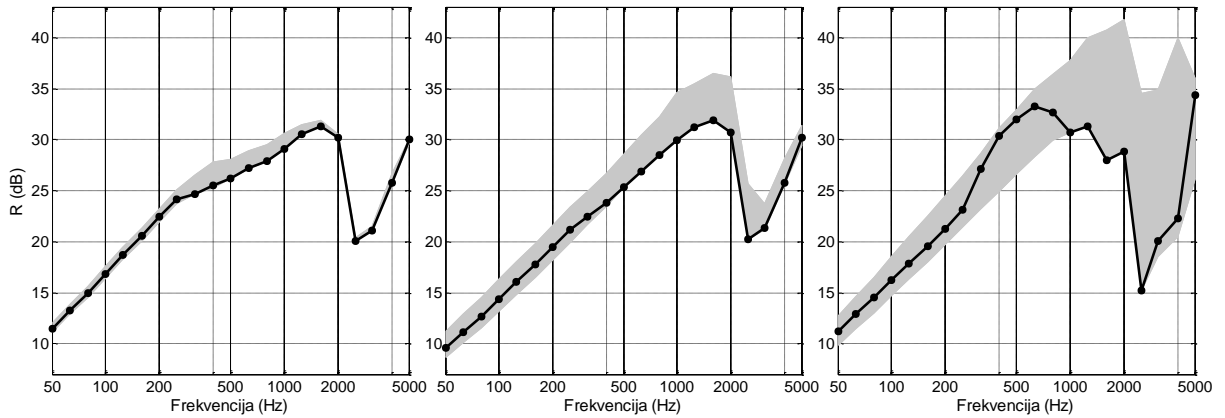
Slika 10.308 Izolacine moci dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada tehničkih fakulteta (Bulevar kralja Aleksandra 73 – bočno)



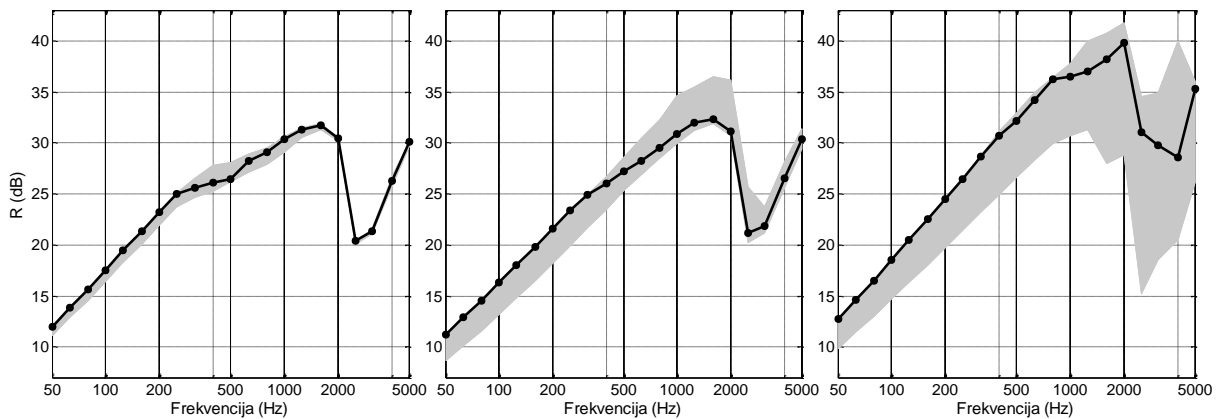
Slika 10.309 Izolacine moci dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada tehničkih fakulteta (Bulevar kralja Aleksandra 73)



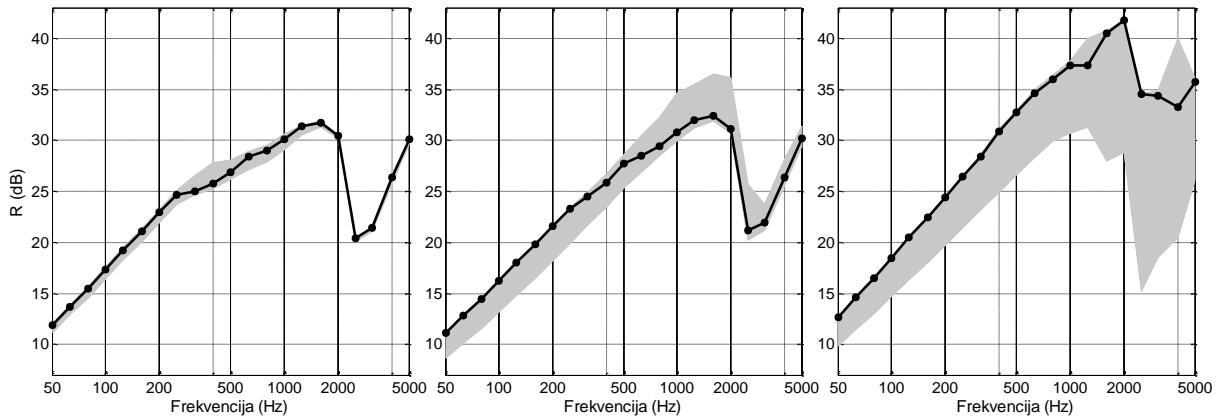
Slika 10.310 Izolacione moci dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada Molerova (Molerova 70)



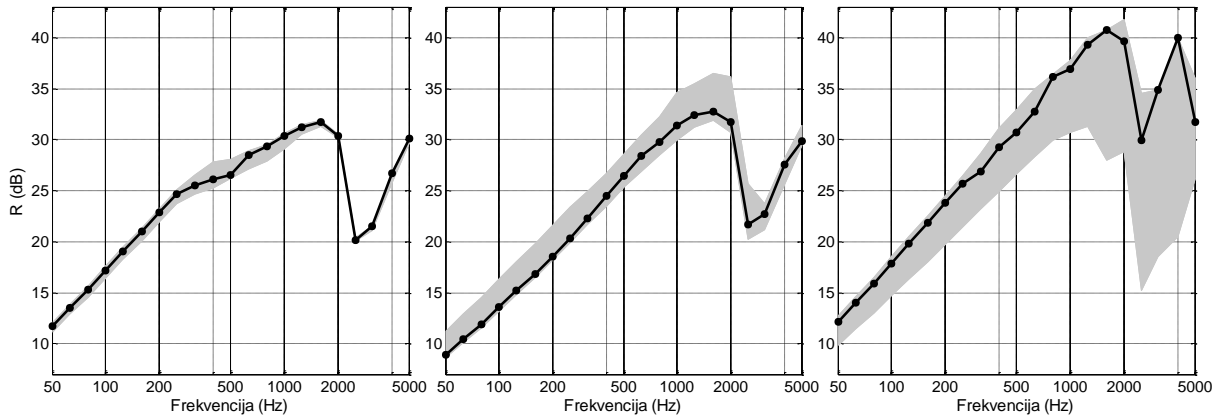
Slika 10.311 Izolacione moci dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada Molerova (Molerova 70) – visina 2



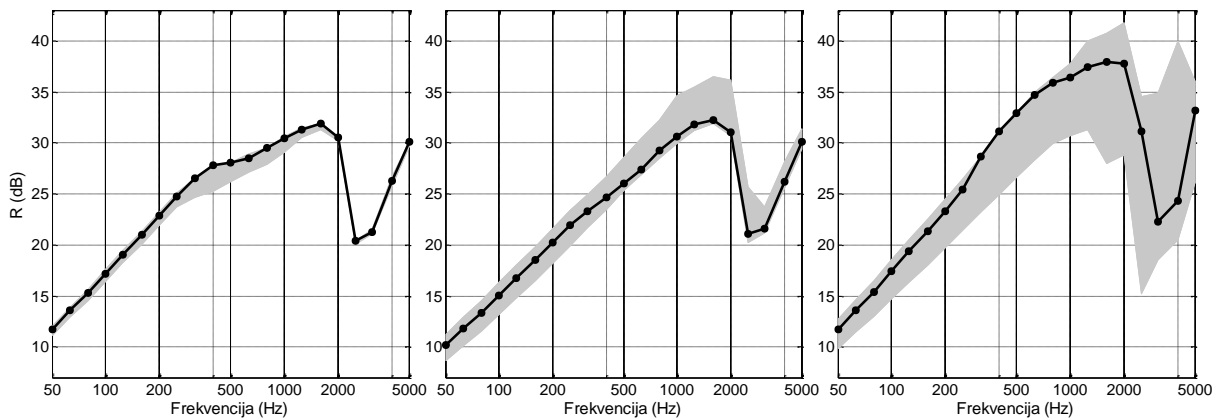
Slika 10.312 Izolacione moci dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada Zavoda za fiziku (Kraljice Marije 16)



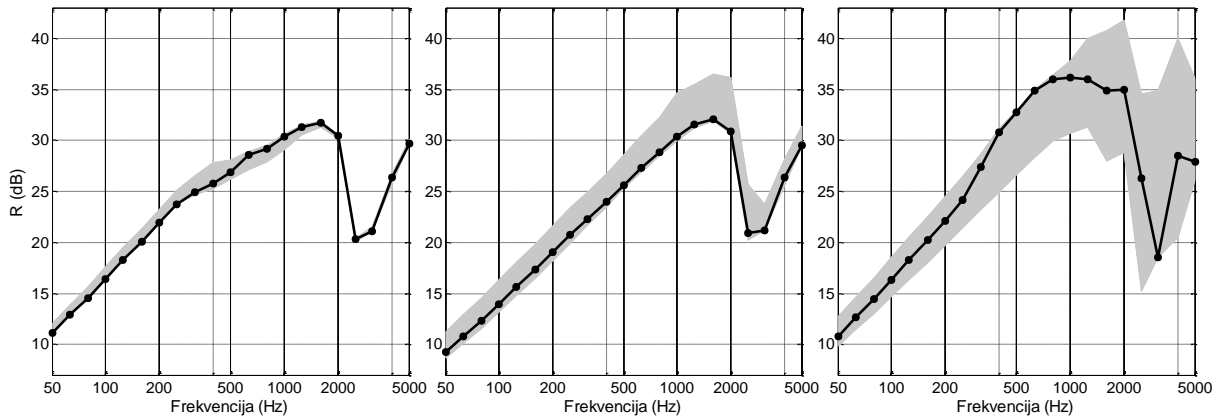
Slika 10.313 Izolacine moci dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada
Zavoda za fiziku (Kraljice Marije 16) – visina 2



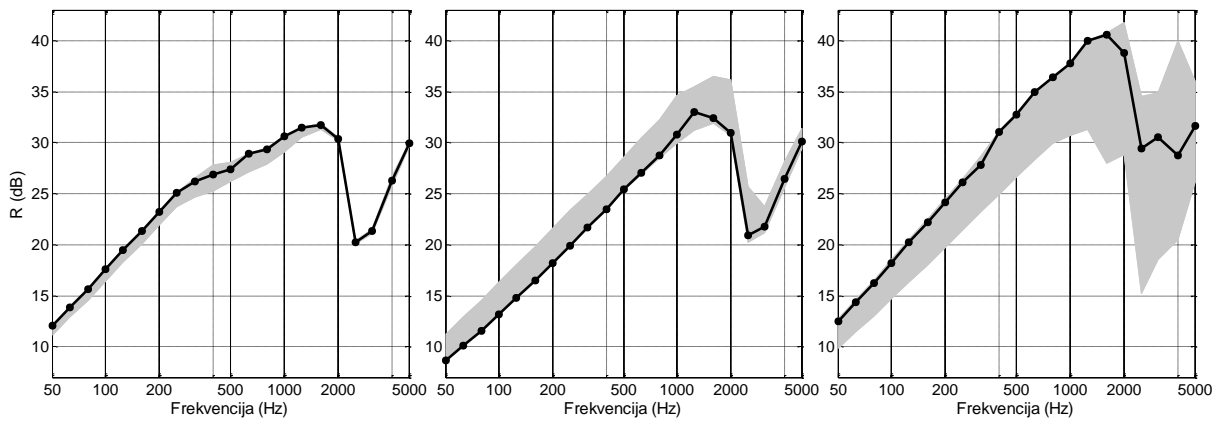
Slika 10.314 Izolacine moci dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada
Zavoda za fiziku (Ruzveltova 1a)



Slika 10.315 Izolacine moci dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada Ilije
Garašanina 19



Slika 10.316 Izolacione moci dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada Ilije Garašanina 19 – visina 2



Slika 10.317 Izolacione moci dobijene sa CB, CLEAN-SC i DAMAS2 algoritmom za lokaciju Zgrada Tehnološkog fakulteta (Karnegijeva 4)

Biografija autora

Miloš R. Bjelić je rođen 24.9.1989. godine u Priboju. Osnovnu školu završio je u Novoj Varoši sa odličnim uspehom. Srednju Tehničku PTT školu u Beogradu završio je 2008 godine sa odličnim uspehom. Elektrotehnički fakultet u Beogradu upisao je 2008. godine. U toku osnovnih studija na Odseku za telekomunikacije i informacione tehnologije, smer Audio i video tehnologije, ostvario je prosečnu ocenu 9,18. Diplomirao je u julu 2012. godine sa ocenom 10 na temu „Radna stanica za ispitivanje karakteristika audio sistema“. Mentor prilikom izrade diplomskog rada bio je prof. dr Miomir Mijić. Za vreme osnovnih studija na međunarodnoj konferenciji TELFOR 2011 dobitnik je nagrade „Ilija Stojanović“ za najbolji studentski rad na konferenciji. Master studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, modul Audio i video tehnologije, upisao je 2012. godine. U periodu od upisa do juna 2013. godine položio je sve ispite sa prosečnom ocenom 10,00. U septembru 2013. godine završio je master studije odbranom master teze pod nazivom „Praktična realizacija elektronskih bubnjeva“. Mentor prilikom izrade master rada bila je prof. dr Dragana Šumarac Pavlović. Tokom osnovnih i master studija bio je stipendista Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja i opštine Nova Varoš. U četvrtoj godini osnovnih studia boravio je na jednomesečnoj stručnoj praksi u JP Emisiona tehnika i veze. U periodu između osnovnih i master studija, obavio je tromesečnu praksu u firmi SBB (Serbian Broad Band).

Od oktobra 2013. godine Miloš Bjelić je student doktorskih akademskih studija na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu na modulu Telekomunikacije. Od novembra 2013. do oktobra 2017. godine bio je zaposlen na Elektrotehničkom fakultetu, Katedra za Telekomunikacije u zvanjima istraživač pripravik i istraživač saradnik. Od oktobra 2017. zaposlen je na Elektrotehničkom fakultetu na Katedri za Telekomunikacije u zvanju asistenta. Do danas je bio angažovan na izvođenju laboratorijskih vežbi i računskih vežbi iz predmeta: Električna merenja, Praktikum softverski alati, Obrada signala 1, Obrada signala 2, Osnovi govorne komunikacije, Adaptivna obrada signala, Elektroakustika, Audio sistemi, Akustički dizajn, Zaštita od buke i vibracija, Ozvučavanje, Obrada audio signala. Pored toga, učestvovao je u izradi velikog broja diplomskih radova, master radova, studentskih projekata i seminarskih

radova. Od 2015. godine učestvuje u pripremi studenata za Elektrijadu iz predmeta Telekomunikacije. Učestvovao je na domaćim i međunarodnim naučno-istraživačkim projektima:

- Integracija i harmonizacija sistema zvučne zaštite u zgradama u kontekstu održivog stanovanja (TR36026, 1.11.2013-).
- Razvoj visokog obrazovanja: „Primena IT u merenju i kontroli buke“, (2017-2018).
- ERASMUS+ “BENEFIT – Boosting the telecommunications engineer profile to meet modern society and industry needs”, (Grant agreement no: 170025120), European Commission, 2017-2020.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Милош Бјелић

Број индекса 2013/5004

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Анализа угаоне расподеле инцидентне енергије спољашње буке применом микрофонског низа

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 1.2.2018.

Милош Бјелић

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Милош Бједић

Број индекса 2013/5004

Студијски програм Телекомуникације

Наслов рада Анализа угаоне расподеле инцидентне енергије спољашње буке применом микрофонског низа

Ментор др Драгана Шумарац Павловић, ванредни професор

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 1.2.2018.

Милош Бједић

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Анализа угаоне расподеле инцидентне енергије спољашње буке применом микрофонског низа

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

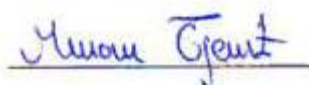
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 1.2.2018.



1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.