

Implementacija algoritma za određivanje smera nailaska zvuka na otvorenom hardveru

Nebojša Kolarić
Telekomunikacije/Laboratorija za akustiku
Elektrotehnički fakultet, Beograd
Beograd, Srbija
kn235008p@student.etf.bg.ac.rs
ORCID: 0009-0002-9483-6599

dr Miloš Bjelić
Telekomunikacije/Laboratorija za akustiku
Elektrotehnički fakultet, Beograd
Beograd, Srbija
bjelic@etf.rs
ORCID: 0000-0002-5859-1654

Apstrakt— Tehnike procene smera nailaska signala imaju ključnu ulogu u širokom spektru aplikacija, posebno u oblasti akustike. Ove tehnike su neophodne za precizno određivanje lokacije izvora željenih i neželjenih zvučnih signala. Iako je poznato da su ove metode već dugo vremena predmet naučnih istraživanja, implementacija efikasnih algoritama na hardverskim platformama koje omogućavaju obradu signala u realnom vremenu još uvek predstavlja izazov. Ovaj rad se bavi visokorezolucionim metodama procene smera nailaska signala, uključujući *Bartlett*, *Capon* i *MUSIC (Multiple Signal Classification)* metode. Glavni cilj istraživanja je analiza i implementacija algoritma koji najefikasnije funkcioniše u prisustvu refleksija na *Bela* otvorenom hardveru. Ova analiza ima za cilj da doprinese razvoju preciznijih i efikasnijih tehnika za procenu smera nailaska signala, što bi imalo značajan uticaj na poboljšanje performansi i primenljivosti u različitim akustičkim aplikacijama.

Ključne reči—mikrofonski niz, prostorno-vremenska obrada signala, *Bela* hardver

I. UVOD

Procena smera dolaska signala (*DOA - Direction of Arrival*) predstavlja ključni korak u nizu aplikacija poput: bežičnih komunikacija, vojnih i civilnih radarskih sistema, radioastronomije, sonarima, medicinskoj dijagnostici. U svim ovim oblastima bitno je precizno odrediti pravac nailaska korisnog signala i sprečiti pojavljivanje lažnih izvora koji nastaju zbog uticaja bočnih lobova [1-3]. Prva metodologija u ovoj oblasti, *Bartlett*-ov metod iz 1948 [2], primenjivao je tehnike formiranja snopa i periodograma za analizu spektra snage. U odnosu na nju se porede performanse svih ostalih visokorezolucionih metoda. Njena prednost je mala računaska kompleksnost što je čini pogodnom za hardversku implementaciju, međutim njene mane su širok glavni lob i postojanje jakih bočnih lobova u njenoj kriterijumskoj funkciji koji su direktna posledica senzorskog niza [2]. Krajem 1960-ih, razvoj *Capon* metode, takođe poznate kao *MVDR (Minimum Variance Distortionless Response)*, obezbedio je napredak kroz minimizaciju izlazne snage filtra, čime je omogućeno efikasnije suzbijanje šuma i poboljšanje prostorne rezolucije. *Capon* metoda je računski kompleksnija od *Bartlett*-ove metode jer zahteva proračun inverzne kovarijacione matrice, ali zato dobro potiskuje bočne lobove i ima dosta uži glavni lob [2]. Uvođenjem *MUSIC* metode početkom 1980-ih, koje je razvio R. Schmidt [4], ostvaren je značajan proboj kroz korišćenje eigendekompozicije matrice kovarijance signala. Ova metodologija je omogućila identifikaciju smera dolaska višestrukih izvora signala s visokom preciznošću, čak i u uslovima zagušenog spektra signala [2], [5]. U radu [6] su poređene performanse *Capon* i *MUSIC* metode sa

njenim varijacijama i pokazuje se da *MUSIC* metoda ima uži glavni lob i da bolje potiskuje bočne lobove. Međutim, ova metoda zahteva poznavanje ukupnog broja korisnih signala i zato se primenjuju određene tehnike estimacije. U slučaju loše estimacije broja korisnih signala, metoda ima znatno lošije performanse. Zbog toga se razvijaju razni algoritmi za preciznu estimaciju ovog broja signala da bi poboljšali njen rad u uslovima sa refleksijama [7].

U ovom radu su analizirane performanse tri visokorezolucione metode: *Bartlett*, *Capon*, *MUSIC (Multiple Signal Classification)*. Jedan od ciljeva ovog rada je pronalaženje najbolje metode iz skupa visokorezolucionih metoda koja će moći da se izvršava u realnom vremenu na otvorenom hardveru. Kriterijumi za odabir metode su: da precizno odredi pravac nailaska širokopojasnog signala, maksimalno potisne bočne lobove iz dijagrama usmerenosti, ima što manje računskih operacija zbog implementacije na hardveru i radi u uslovima gde postoje refleksije zvuka. Metode će biti testirane u *off line* modu na signalima koji su snimljeni na nizu od 18 neuniformno raspoređenih mikrofona, a odabrana metoda će biti implementirana na hardveru koji će imati niz od 8 ekvidistantnih mikrofona. Dodatan problem koji se javlja je to što je koristan signal širokopojasni. Umesto upotrebe gore pomenutih metoda na samo jednoj frekvenciji, potrebno ih je upotrebiti na različitim frekvencijama i zatim usrednjiti njihove kriterijumske funkcije da bi se dobila precizna estimacija pravca nailaska signala [5].

U prvom poglavlju je predstavljen cilj rada i određene osobine metoda koje će biti testirane. Drugo poglavlje sadrži teorijsku osnovu za razumevanje modelovanja signala na mikrofonskom nizu i principe rada visokorezolucionih metoda. U trećem poglavlju se porede performanse metoda nad signalima koji su snimljeni pomoću akustične kamere i donosi odluka koja metoda ima najbolje performanse po definisanim kriterijumima. Četvrto poglavlje opisuje implementaciju algoritama na hardveru, korišćenu opremu i rad *Bela* procesora. U petom poglavlju će biti prikazani rezultati hardverske implementacije, kao i ograničenja metode i korišćenog hardvera. Na kraju, u šestom poglavlju će biti dat zaključak i moguća unapređenja.

II. TEORIJSKA OSNOVA

A. Steering vektor

U obradi signala sa mikrofonskih nizova postoji bitna razlika između uskopojasnog i širokopojasnog signala. U slučaju uskopojasnog signala, propagaciona kašnjenja signala na mikrofonskom nizu su manja od recipročne vrednosti spektralne širine dolaznog signala i modeluju se kao fazna kašnjenja. Uskopojasni signali se matematički modeluju u vremenskom

domenu. Kod širokopojasnih signala je situacija obrnuta i oni se matematički modeluju u spektralnom domenu [5]. *Steering* vektor je vektor koji modeluje kašnjenje signala na svakom mikrofону u mikrofonskom nizu. Izraz za *steering* vektor [5]:

$$v(f, \phi, \theta) = e^{(-i\omega\tau_p)} \quad (1)$$

gde i predstavlja imaginarnu jedinicu, ω predstavlja kružnu učestanost a τ_p kašnjenje koje se javlja zbog talasnog fronta koji ne stiže u isto vreme na sve mikrofone. Skup svih *steering* vektora $v(f, \phi, \theta)$ za $\phi \in (-\pi, \pi)$ i $\theta \in (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ predstavlja prostornu transfer funkciju mikrofonskog niza na frekvenciji f i naziva se *array manifold* [5].

B. Princip rada širokopojasnih visokorezolucionihi metoda

U ovom radu primenjene su širokopojasne visokorezolucione metode na bazi spektralne kovarijacione matrice. Kod ove metode najbitniji korak je određivanje spektralne kovarijacione matrice [3]:

$$R_{nm}(f) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{k}{K} \cdot (X_n(f, N) \cdot X_m^*(f, N)) \quad (2)$$

gde je $R_{nm}(f)$ element kovarijacione matrice na određenoj frekvenciji, $X_n(f, N)$ označava vrednost Furijeove transformacije nad signalom sa n -tog mikrofona nad N odbiraka dolaznog signala, $X_m^*(f, N)$ označava isto to samo sa m -tog mikrofona i nad ovom vrednosti je primenjena opracija $*$ konjugacije gde imaginarni deo menja svoj znak. K predstavlja broj prozora za usrednjavanje spektralne kovarijacione matrice. U izrazu (2), u sumi je dodan težinski faktor (k/K) koji ne postoji u referenci [3]. Razlog njegovog dodavanja je to što sistem treba da prati izvor zvuka ako se on kreće i u tim situacijama najveći utičaj na spektralnu kovarijacionu matricu treba da ima poslednji prozor. Kada se proračunaju svi elementi, konačna spektralna kovarijaciona matrica izgleda:

$$R(f) = \begin{bmatrix} R_{11} & \cdots & R_{1L} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{L1} & \cdots & R_{LL} \end{bmatrix} \quad (3)$$

C. Bartlett metoda

Bartlett-ova metoda je istorijski posmatrano prva visokorezoluciona metoda. Ona je takođe najjednostavnija metoda po pitanju računске složenosti. Kriterijumska funkcija ove metode je data sledećim izrazom [5]:

$$P_{bartlett}(f, \phi, \theta) = v^H(f, \phi, \theta) R(f) v(f, \phi, \theta) \quad (4)$$

gde operacija H predstavlja kompleksnu transpoziciju, a $R(f)$ spektralnu kovarijacionu matricu. Da bi se tačno odredio pravac nailaska širokopojasnog signala potrebno je analizirati u određenom opsegu frekvencija i finalni rezultat usrednjiti tako da dobijemo jednu mapu sa vrednostima koje odgovaraju tačno određenom ϕ i θ uglu [5]:

$$\overline{P_{bartlett}}(\phi, \theta) = \frac{1}{H} \sum_{f_i=1}^H P_{bartlett}(f_i, \phi, \theta) \quad (5)$$

gde f_i predstavlja frekvenciju iz skupa odabranih frekvencija. Najveće mane *Bartlett*-ove metode su širok glavni lob što uzrokuje smanjenu selektivnost pri prostornom razdvajanju

bliskih zvučnih izvora i nikakvo potiskivanje bočnih lobova koji su direktna posledica geometrije mikrofonskog niza.

D. Capon metoda

Capon metode se zasniva na maksimizaciji srednje snage na izlazu *Capon*-ovog optimalnog prostornog filtra u funkciji ϕ i θ nailaska signala. Kriterijumska funkcija *Capon* metode [5]:

$$P_{capon}(f, \phi, \theta) = \frac{1}{v(f, \phi, \theta)^H R^{-1} v(f, \phi, \theta)} \quad (6)$$

gde je R^{-1} inverzna matrica od matrice R . Takođe zbog širokopojasnosti signala koji dolazi na mikrofonski niz mora da se odradi usrednjavanje po frekvencijama:

$$\overline{P_{capon}}(\phi, \theta) = \frac{1}{H} \sum_{f_i=1}^H P_{capon}(f_i, \phi, \theta) \quad (7)$$

E. MUSIC metoda

MUSIC metoda se zasniva na dekompoziciji spektralne kovarijacione matrice signala R na sumu dveju matrica, jedna matrica predstavlja matricu podprostora korisnih signala a druga matricu podprostora šuma E_n [5]. Kriterijumska funkcija *MUSIC* metode se može izračunati prema sledećem izrazu:

$$P_{music}(f, \phi, \theta) = \frac{1}{v(f, \phi, \theta)^H E_n E_n^H v(f, \phi, \theta)} \quad (8)$$

Nakon primene izraza za usrednjavanje po frekvencijama dobijamo finalnu mapu vrednosti iz koje se mogu odrediti pravci nailaska dolaznih signala:

$$\overline{P_{music}}(\phi, \theta) = \frac{1}{H} \sum_{f_i=1}^H P_{music}(f_i, \phi, \theta) \quad (9)$$

III. ANALIZA PERFORMANSI VISOKOREZOLUCIONIHI METODA

A. Postavka merenja i upotrebljeni parametri

Radi potrebe analize visokorezolucionihi metoda snimljeni su signali sa akustične kamere [3], a pomoću *MATLAB* programskog jezika u *off line* modu su analizirane kriterijumske funkcije prethodno pomenutih metoda. Ova akustična kamera ima neuniformni planarni mikrofonski niz sa 18 mikrofona. Signali su snimljeni u dva scenarija: u anehoičnoj sobi (prostora bez refleksija) i u učionici (prostora sa refleksijama). U oba slučaja su postojala 2 zvučnika koja su emitovala *MLS* sekvencu koja je širokopojasni signal. Ravan na kojoj su postavljeni zvučnici je bila na rastojanju 1.5 m od centra akustičke kamere, a međusobno rastojanje između zvučnika je iznosilo 0.5 m.

Signali koje su mikrofoni prikupljali su odabirani frekvencijom odabiranja 65536 Hz. Radi proračuna spektralne kovarijacione matrice, potrebno je bilo primeniti *FFT* (Fast Fourier Transformation) [7] u 2048 tačaka i to nad svim prijemnim kanalima. Zatim se proračunava usrednjena spektralna kovarijaciona matrica prema izrazu (2) gde je $K=6$. Nakon toga je primenjena *ridge regression* na tako usrednjenju spektralnu kovarijacionu matricu. Ovo je urađeno zbog *Capon* metode, jer je potrebno proračunati inverznu matricu od spektralne kovarijacione matrice. Primenom ove metode sprečava se mogućnost nastanka singularne matrice od koje ne može da se proračuna inverzna matrica i *Capon* metoda postaje robusnija na

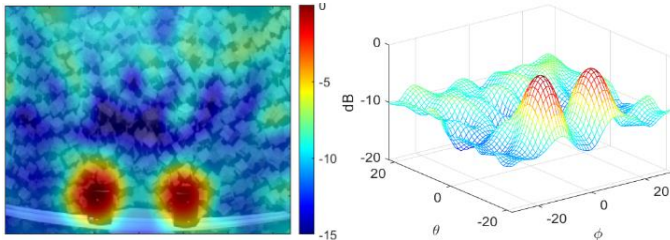
šum i na manji interval usrednjavanja K [10]. Izraz za *ridge regression* algoritam:

$$R = (1 - \mu)R + \mu F; F = \frac{\text{Tr}(R)}{L} I \quad (10)$$

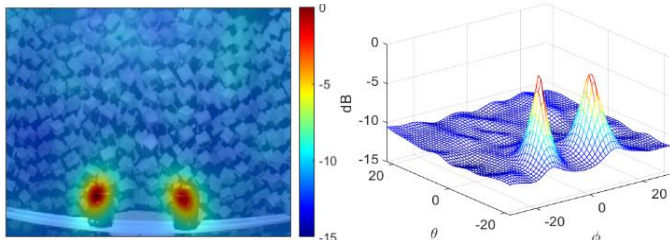
gde \tilde{R} predstavlja spektralnu kovarijacionu matricu nakon *ridge regression* algoritma, R je početna spektralna kovarijaciona matrica, μ je koeficijent koji može imati vrednosti između 0 i 1, $\text{Tr}(R)$ je trag matrice, L je broj elemenata na glavnoj dijagonali matrice i I je jedinična matrica. U simulaciji su se najbolji rezultati dobili za μ koeficijent vrednosti 0,001. Takođe, prilikom primene *MUSIC* metode se smatralo da je već poznato da dolaze samo dva signala na mikrofonski niz.

B. Rezultati visokorezolucionih metoda

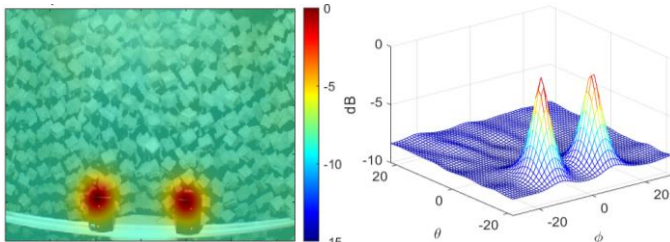
Rezultati kriterijumskih funkcija su preklapljeni sa slikom sa video kamere. Na sledećim slikama će biti prikazani rezultati usrednjenih kriterijumskih funkcija u anehoičnoj sobi. Početna frekvencija za koju se izračunava kriterijumska funkcija je 3712 Hz, dok je krajnja frekvencija 8992 Hz. Međutim nije za svaki spektralni bin računata kriterijumska funkcija, već za svaki treći što daje korak od 96 Hz (pošto je $\Delta f = 32$ Hz).



Sl. 1 Rezultati *Bartlett* metode u anehoičnoj sobi (levo) kriterijumska funkcija je prikazana zajedno sa slikom, (desno) kriterijumska funkcija



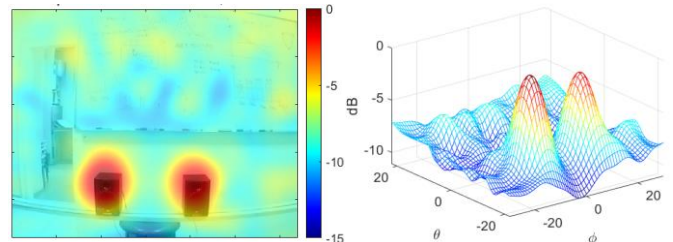
Sl. 2 Rezultati *Capon* metode u anehoičnoj sobi (levo) kriterijumska funkcija je prikazana zajedno sa slikom, (desno) kriterijumska funkcija



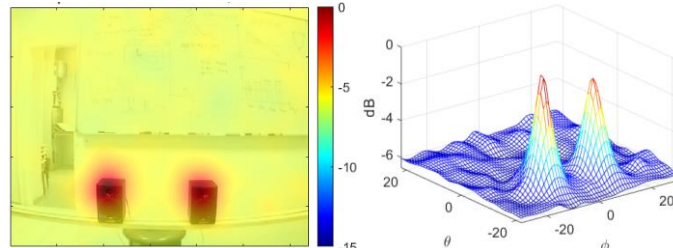
Sl. 3 Rezultati *MUSIC* metode u anehoičnoj sobi (levo) kriterijumska funkcija je prikazana zajedno sa slikom, (desno) kriterijumska funkcija

Na Sl. 1. se mogu videti prethodno opisane osobine *Bartlett*-ove metode. A to je postojanje jakih bočnih lobova i širok glavni lob [2], [5]. Zbog ovoliko jakih bočnih lobova mogao bi se pogrešno proceniti ukupan broj signala koji dolaze na mikrofonski niz. Na Sl. 2 i Sl. 3 se mogu videti rezultati *Capon* i *MUSIC* metode. Obe metode uspešno potiskuju bočne lobove (gde je *MUSIC* malo bolji) i obe metode imaju uske glavne lobove (gde je *MUSIC* za nijansu bolji). Međutim ono što se razlikuje kod obe

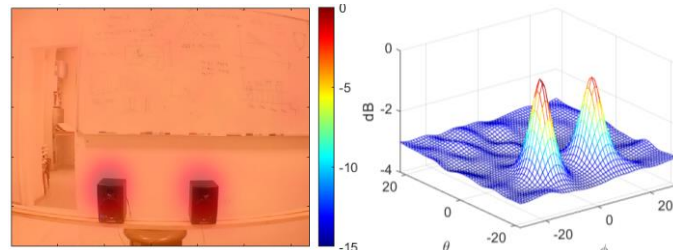
metode je dinamika između maksimalne vrednosti u kriterijumskoj funkciji i okoline. Kod *MUSIC* metode je ona oko 8 dB, dok kod *Capon* metode je ona oko 10 dB. Na sledećim slikama su prikazani rezultat metoda kada su signali snimljeni u učionici.



Sl. 4 Rezultati *Bartlett* metode u učionici, (levo) kriterijumska funkcija je prikazana zajedno sa slikom, (desno) kriterijumska funkcija



Sl. 5 Rezultati *Capon* metode u učionici, (levo) kriterijumska funkcija je prikazana zajedno sa slikom, (desno) kriterijumska funkcija



Sl. 6 Rezultati *MUSIC* metode u učionici, (levo) kriterijumska funkcija je prikazana zajedno sa slikom, (desno) kriterijumska funkcija

Sa slika Sl. 4, Sl. 5 i Sl. 6 se može uočiti da je smanjena dinamika kriterijumskih funkcija u uslovima sa refleksijama. Ovo je glavna razlika u odnosu na situaciju kada su signali snimljeni u anehoičnoj sobi. *Bartlett* i *MUSIC* metoda su zadržale svoje osobine, ali *Capon* pokazuje malo bolje performanse nego pre. Iako *MUSIC* i dalje najbolje potiskuje bočne lobove, *Capon* ima istu širinu glavnog loba kao *MUSIC* i dinamiku u kriterijumskoj funkciji veću za 3 dB u odnosu na dinamiku kod *MUSIC* metode. Ovo pokazuje očekivano, a to je da *MUSIC* metoda ima problema u uslovima sa refleksijama, čak i kada se tačno estimira broj očekivanih signala [5]. Metoda koja će biti implementirana na hardveru mora da zadovolji određene kriterijume:

- da potiskuje što više bočne lobove,
- da precizno procenjuje pravac nailaska signala na mikrofonski niz,
- da dobro radi u uslovima sa refleksijama i
- da ima što manje računskih operacija zbog implementacije na hardveru.

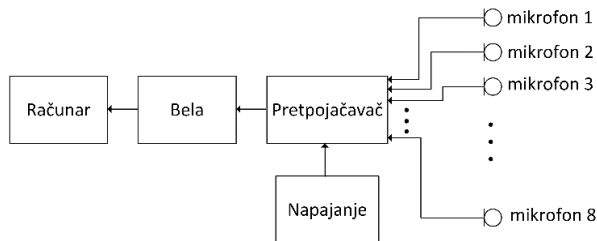
Bartlett-ova metoda je lošija od ostale dve po svim kriterijumima osim po računskoj kompleksnosti ali zbog dosta lošijih performansi od ostale dve metode neće biti implementirani na hardveru. *MUSIC* metoda se u uslovima bez refleksija pokazala kao najbolja metoda jer je najviše

potiskivala bočne lobove i imala najuži glavni lob, međutim u uslovima sa refleksijama se izdvojila kao najbolja samo u potiskivanju bočnih lobova iako je zanemarena moguća greška u procenjenju broja signala koji dolaze na mikrofonski niz. Na kraju *Capon* metoda se pokazala podjednako dobro kao *MUSIC* metoda u uslovima bez refleksija, ali u uslovima sa refleksijama kao bolja. Iako je *MUSIC* metoda malo više potiskivala bočne lobove, *Capon* ima jednako uzak glavni lob ali bolju dinamiku od *MUSIC* metode za 3 dB. Međutim segment u kome *Capon* ima prednost u odnosu na *MUSIC* metodu je njegova manja računska kompleksnost. Takođe ima manje računskih operacija i ne zahteva algoritam koji će da estimira broj signala koji dolaze na mikrofonski niz [8], *Capon* metoda će biti implementiran na hardveru.

IV. HARDVERSKA IMPLEMENTACIJA

A. Korišćena oprema

Da bi se realizovao sistem za određivanje smera nailaska signala na mikrofonskom nizu potrebna je određena hardverska oprema: mikrofonskog niza, pretpojačavača, određenog hardvera na kome će se algoritam izvršavati u realnom vremenu i napajanja za hardver i pretpojačavač. Na Sl. 8 prikazan je blok dijagram korišćene opreme.



Sl. 7 Blok dijagram korišćene opreme

Mikrofonski niz na Sl. 7 je uniformni mikrofonski niz sa 8 mikrofona koji su na međusobnom rastojanju 7 cm jedan od drugog. Ovde su upotrebljeni neusmereni elektret mikrofoni, a korišćeni mikrofonski niz je prikazan na Sl. 8



Sl. 8 Upotrebljen mikrofonski niz

B. Bela hardver i audio ekspander

Za implementaciju algoritma korišćena je platforma *Bela*, koja predstavlja računarski sistem namenjen za obradu audio signala i bazira se na *BeagleBone* platformi. Izgled *Bela* platforme prikazan je na Sl. 9. *Bela* koristi *Xenomai real-time Linux* ekstenziju za izvršavanje audio koda na skoro *bear-metal* prioritetu. Ovo je glavna karakteristika ovog procesora jer garantuje da će se audio kod uvek prvi izvršiti na hardveru i zbog toga ima veoma mala kašnjenja prilikom obrade audio signala. Za realizaciju ovog sistema neophodna je upotreba audio ekspandera (treća pločica na Sl. 10) jer *Bela* hardver ima samo 2 audio ulaza pa upotreba ovog ekspandera proširuje broj audio ulaza sa 2 na 8. Princip rada audio ekspandera je taj da pretvara 8 analognih ulaza koje *Bela* hardver poseduje u 8 audio ulaza pomoću određenih hardverskih komponenti [11].

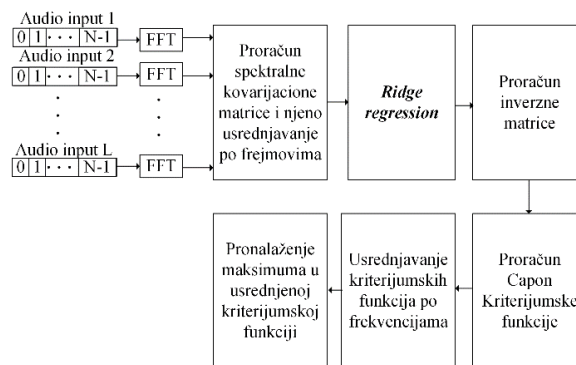


Sl. 9 Bela hardver sa audio ekspanderom

C. Implementacija algoritma na Bela-i

Prilikom implementacije ovog sistema na *Bela*-i, maksimalno je iskorišćena *setup()* funkcija na *Bela*-i koja se izvršava samo jednom prilikom pokretanja programa. U njoj su proračunate vrednosti za svaki mogući *steering* vektor (za svaki ugao i frekvenciju od interesa).

Pošto je talas koji dolazi na mikrofonski niz sferni, potrebno je poznavati na kojoj distanci od mikrofonskog niza se nalazi zvučni izvor (ova distanca se unosi na početku programa). Razlog zašto se proračun *steering* vektora vrši samo za azimutne uglove je taj što se koristi linijski mikrofonski niz čije su koordinate mikrofona na x osi. Ovakav niz nema sposobnost određivanja elevacionih uglova kao ni određivanja da li signal dolazi spreda ili pozadi [3]. Zbog toga je izabran opseg skeniranja prostora od -50 stepeni do +50 stepeni, a ugaona rezolucija se definiše na početku programa. Nakon završetka *setup()* funkcije i sve do zaustavljanja programa se izvršava *render()* funkcija i obrada koja se izvršava u ovoj funkciji je prikazana na Sl. 10.



Sl. 10 Obrada koja se izvršava u *render()* funkciji

Na samom početku *render()* funkcije pristupa se svim audio baferima, i nad svakim od njih se primenjuje *FFT* algoritam. Jedna od prednosti *Bela* platforme je mogućnost odabira dužine ulaznih bafera i upotrebe već postojeće (optimizovane) funkcije za proračun *FFT* spektra. *FFT* algoritam se izračunava u 2048 tačaka, a dužina audio bafera za svaki prijemni kanal je podešena da bude ista. Frekvencija odabiranja sa kojom se snimaju signali na mikrofona je 22050 Hz, tako da je frekvencijaska rezolucija 10.76 Hz. Diskretne vrednosti signala koje se dobiju na izlazu *FFT* algoritma se koriste za proračun spektralne kovarijacione matrice prema izrazu (3).

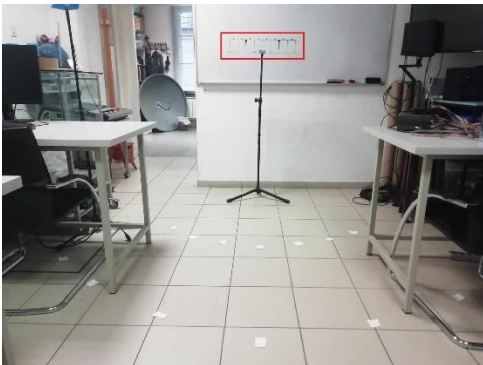
Sledeći korak je primena *ridge regression* algoritma na svaku usrednjenu spektralnu kovarijacionu matricu. Nakon *ridge regression algoritma* proračunava se inverzna matrica primenom *Cholesky* dekompozicije [12]. Posle izračunavanja inverzne matrice, imamo sve neophodne podatke da

proračunamo kriterijumske funkcije *Capon* metode prema izrazu (6). Zatim usrednjavamo sve kriterijumske funkcije po frekvencijama prema izrazu (7) da bi dobili finalnu kriterijumsku funkciju. Na kraju u ovoj funkciji tražimo maksimalnu vrednost i azimutni ugao na kojem se nalazi ta maksimalna vrednost predstavlja smer iz kog zvučni izvor emituje zvuk.

V. REZULTATI HARDVERSEK IMPLEMENTACIJE

U ovom poglavlju analizirana je tačnost procene smera nailaska zvuka na mikrofonskom nizu kao i prostorna moć razdvajanja dva bliska zvučna izvora. Frekventijski opseg na kome se izračunava *Capon* kriterijumska funkcija je od 1500 Hz do 5000 Hz, gde će proračun spektralne kovarijacione matrice biti odrađen na svaka 3 bina u *FFT* spektru. Period usrednjavanja spektralne kovarijacione matrice po prozorima je 6. Kriterijumske funkcije su računane za azimutne uglove od -50 stepeni do 48 stepeni sa korakom 2 stepena. Svi ostali parametri sistema koji su korišćeni su opisani u prethodnim poglavljima. Sa ovim parametrima *Bela* je radila na 80 % CPU (*Central Processing Unit*) od svog maksimuma.

Implementirani sistem je testiran u učionici sa različitim konfiguracijama izvora zvuka. Testirana je procena smera nailaska zvuka kada se zvučni izvor nalazi na rastojanju 1 m od mikrofonskog niza na uglovima: 0° , $\pm 16^\circ$, $\pm 30^\circ$ i $\pm 46^\circ$. Na istim ovim uglovima testirana je situacija kada se zvučni izvor nalazi na 2 m od mikrofonskog niza. Na Sl. 11 je prikazana učionica u kojoj su testovi obavljani. Crvenim pravougaonikom je označen mikrofonski niz, a papirići na podu označavaju pozicije na kojima su postavljani zvučni izvori tako da budu iste visine kao mikrofonski niz. Rezultati testova su prikazani u Tabeli 1.



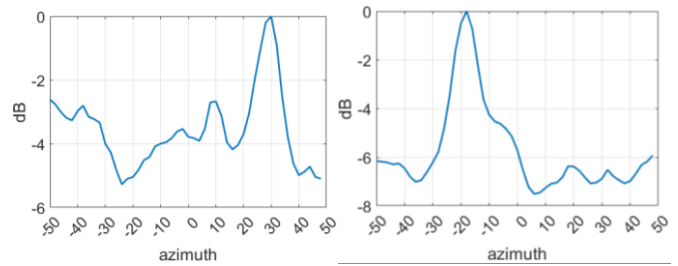
Sl. 11 Učionica u kojoj su merene performanse *Capon* algoritma

TABELA I. REZULTATI *CAPON* METODE

TAČAN UGAO	-46°	-30°	-16°	-0°	16°	30°	46°
Izvor zvuka na 1m rastojanja	-48°	-32°	-18°	-2°	14°	30°	44°
Izvor zvuka na 2m rastojanja	-46°	-32°	-16°	-2°	14°	28°	44°

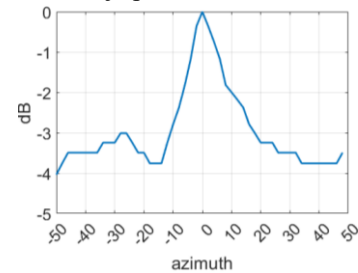
Iz tabele 1 se vidi da *Capon* metoda odlično procenjuje smer nailaska zvučnog talasa na mikrofonskom nizu. Maksimalno odstupanje od realnih uglova iznosi \pm vrednost ugaone rezolucije (2°), što je vrlo verovatno do greške pri postavi celog testa jer vidimo da su procenjeni uglovi uvek tačni ili za -2° pomereni od realnih uglova. Na Sl. 12 su prikazani rezultati

Capon-ovih kriterijumskih funkcija za slučajeve kada se zvučni izvor nalazio na 1 m 30° i 1 m -18° .



Sl. 12 Kriterijumske funkcije: izvor zvuka na 1m 30° (levo) i 1m -18° (desno)

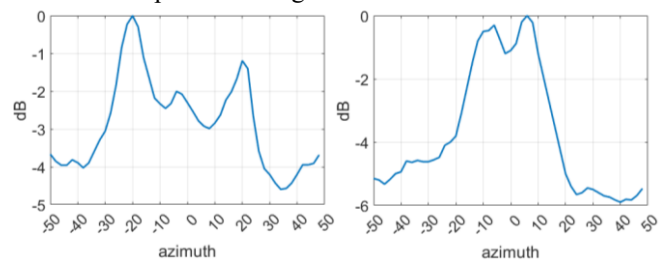
Sa obe slike se jasno vidi iz kog pravca nailazi zvuk na mikrofonski niz, to je ugao za koji postoji jasan globalni maksimum. Takođe, vidimo kako *Capon* metoda uspešno potiskuje bočne lobove i stvara dinamiku od 4 dB do 6 dB. Međutim, na obe slike se mogu uočiti određena ispupčenja u opsegu od -10° i 10° . Na desnoj slici se taj lokalni maksimum spaja sa *peak*-om koji predstavlja globalni maksimum, dok na levoj slici vidimo mali lokalni maksimum na -2.7° . Pretpostavka je da je to saobraćajna buka, pošto se učionica nalazi pored prometne ulice. Ova buka dolazi kroz prozore koji nemaju dobru zvučnu izolaciju i tačno obuhvataju taj prostorni ugao od -10° i 10° . Da bi ovo bilo dokazano, testirana je situacija kada nijedan zvučni izvor ne postoji u učionici i kriterijumska funkcija *Capon* metode je prikazana na Sl. 13.



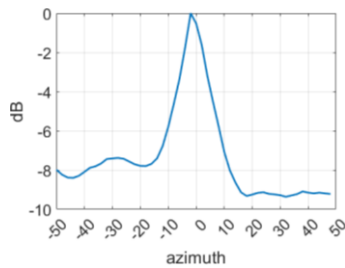
Sl. 13 Rezultat *Capon*-a kada nema nijednog zvučnog izvora u učionici

Sa Sl. 13 se jasno može videti da kriterijumska funkcija ima maksimum u 0° što odgovara sredini prozora. Takođe se može uočiti da je dinamika ovog izvora zvuka mala i oko 3 dB. Razlog za to je što taj zvuk nije mnogo glasan i samim tim nema veliki uticaj na procenu smera nailaska zvuka na mikrofonskom nizu. Međutim da je malo glasniji sigurno bi prouzrokovao lažne detekcije zvučnih izvora.

U nastavku je analizirana prostorna moć razdvajanja dva zvučna izvora. Za ovaj test korišćena su dva telefona na kojima su podešene jačine zvuka da budu približno iste. Sa jednog telefona je puštana pesma [13] dok je sa drugog telefona puštana pesma [14]. Na sledećim slikama su prikazani rezultati kada se zvučni izvori nalaze na 1 m rastojanja u odnosu na mikrofonski niz ali na različitim prostornim uglovima.



Sl. 14 (levo) Izvori se nalaze na $\pm 20^\circ$, (desno) Izvori se nalaze na $\pm 8^\circ$

Sl. 15 Izvori se nalaze na $\pm 20^\circ$

Na Sl. 14 levo se može videti kada se izvori nalaze na $\pm 20^\circ$, *Capon* metoda jasno detektuje dva odvojena *peak*-a koji predstavljaju uglove pod kojima dolazi zvučni talas na mikrofonski niz (i naravno centralni *peak*-a koji potiče od saobraćajne buke). Međutim, kada se zvučni izvori nalaze dovoljno blizu poput $\pm 8^\circ$, onda se 2 maksimuma spajaju u jedan kao što se to može videti na Sl. 14 desno. Iz ove kriterijumske funkcije je veoma teško algoritamski odrediti da se u prostoru nalaze dva zvučna izvora. Na kraju kada su zvučni izvori preblizu onda se 2 *peak*-a spajaju u jedan koji je malo širi u svom podnožju i prouzrokuje veću dinamiku između globalnog maksimuma i okoline. Ovo se može videti na Sl. 15 gde su zvučni izvori na $\pm 2^\circ$. Ovde ne postoji mogućnost da se odredi da u prostoru postoje dva zvučna izvora.

VI. ZAKLJUČAK

Glavni cilj ovog rada je bilo pronalaženje algoritma sa najboljim performansama u uslovima gde postoje refleksije zvuka. Testirane su performanse tri visokorezolucione metode: *Bartlett*, *Capon* i *MUSIC*. Utvrđeno je da *MUSIC* metoda više potiskuje bočne lobova u odnosu na *Capon* metodu, ali da je širina glavnog loba kod obe metode jednako uska a dinamika kod *Capon* metode bolja od *MUSIC* metode za 3 dB. Lošije performanse *MUSIC* metode u uslovima sa refleksijama nisu iznenađujuće, jer ova metoda zavisi od algoritam za estimaciju ukupnog broja signala i može jaku refleksiju da protumači kao koristan signal. Osim ovoga *Capon* metoda ima manje računskih operacija i zato je pogodnija za implementaciju na hardveru. Zbog svih prethodno pomenutih stvari *Capon* metoda je izabrana za implementaciju na hardveru. U radu je opisan postupak implementacije celokupnog sistema sa svim neophodnim koracima i algoritmima poput: usrednjavanja spektralne kovarijacione matrice po prozorima, *ridge regression* algoritma, proračuna inverzne matrice, proračuna *Capon* kriterijumske funkcije i njeno usrednjavanje po frekvencijama. Analizirane su performanse implementiranog sistema koji analizira frekvencijski opseg od 1500 Hz do 5000 Hz. Rezultati su pokazali da implementirana metoda odlično procenjuje pravac nailaska zvuka na mikrofonskom nizu i da su maksimalna odstupanja u proceni smera \pm ugaona rezolucija (2°). Određene smetnje koje su primećene u *Capon* kriterijumskoj funkciji su poticale od saobraćajne buke koja je dolazila kroz prozore učionice. Takođe je testirana prostorna rezolucija implementirane metode, primećeno je kada su izvori bliži od 16° da *Capon* metoda ne može da razdvoji dva izvora. Moguće poboljšanje ovog sistema bi bilo upotreba hardvera sa većom procesorskom moći, jer je korišćeni *Bela* hardver doguran do 80 % svoje procesorske moći. Hardver sa većom procesorskom moći bi omogućio analizu većeg opsega frekvencija.

REFERENCE/LITERATURA

- [1] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory, Analysis and Design*, Third Edition, John Wiley & Sons, 1997. pp. 30-70
- [2] H. L. Van Trees, *Optimum Array Processing Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*, Interscience A John Wiley & Sons, 2002. pp 42-51, pp 1139-1285
- [3] Miloš R. Bjelić, *Analiza ugaone raspodele incidentne energije spoljašnje buke primenom mikrofonskog niza*, Doktorska disertacija, Beograd 2018.
- [4] Ralph O. Schmidt, „Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation“, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, vol. ap-34, March 1986.
- [5] Miljko Erić, Nenad Vukmirović, *Uvod u obradu signala sa antenskih nizova*, Akademska misao, 2019.
- [6] M. Jalali, M. N. Moghaddasi, A. Habibzadeh, „Comparing accuracy for ML, MUSIC, ROOTMUSIC and spatially smoothed algorithms for 2 users“, *Mediterranean Microwave Symposium Conference*, 2009.
- [7] I. Jami, R.F. Ormondroyd, „Improved Method for Estimating Angle of Arrival in Multipath Conditions using the ‘MUSIC’ Algorithm“, *IEEE-APS Conference on Antennas and Propagation for Wireless Communications*, 2000.
- [8] W. Tidd, Y. Zhao, Y. Huang, „A Compact Beamspace DOA Estimation and Beamforming Communication Device“, *Aerospace Conference*, 2011.
- [9] Ljiljana Milić, Zoran Dobrosavljević, Jelena Čertić, „Uvod u digitalnu obradu signala“, *Akademska misao Beograd* 2015.
- [10] M. Dong, Q. Zheng, H. Su, „Automatic robust adaptive beamforming via ridge regression using l1-norm approximation“, *International Conference on Radar*, Sept. 2013
- [11] Bela audio ekspander [online]. Available: <https://learn.bela.io/products/accessories/audio-expander/>
- [12] D. P. Radunović, A. B. Samardžić, F. M. Marić, „Numeričke metode, Zbirka zadataka kroz C, Fortran i Matlab“, *Akademska misao*, 2005.
- [13] Two Steps From Hell – Victory [online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=hKRUPYrAQoE>
- [14] SABATON - Last Dying Breath (Official Lyrics Video) [online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=USz2OR3wdB4>

ABSTRACT

Techniques for estimating the direction of arrival of signals play a crucial role in a wide range of applications, especially in the field of acoustics. These techniques are essential for precisely determining the location of sources of desired and undesired sound signals. Although it is known that these methods have been the subject of scientific research for a long time, the implementation of efficient algorithms on hardware platforms that enable real-time signal processing still presents a challenge. This work thoroughly examines high-resolution methods for estimating the direction of arrival of signals, including Bartlett, Capon, and MUSIC algorithms. The main goal of the research is the analysis and implementation of an algorithm that functions most effectively in the presence of reflections on the Bela open hardware platform. This analysis aims to contribute to the development of more precise and efficient techniques for estimating the direction of arrival of signals, which would have a significant impact on improving performance and applicability in various acoustic applications.

IMPLEMENTATION OF ALGORITHM FOR DIRECTION-OF-ARRIVAL ESTIMATION ON OPEN HARDWARE PLATFORM

Nebojša Kolarić, Miloš Bjelić