

Realizacija adaptivnog prostornog filtra na otvorenom hardveru

Marija Ratković, Miloš Bjelić

Katedra za Telekomunikacije, Laboratorija za Akustiku

Elektrotehnički fakultet

Beograd, Srbija

rm235012p@student.etf.bg.ac.rs, bjelic@etf.rs

Sažetak— Bitan inženjerski zadatak iz oblasti akustike predstavlja realizacija jednostavnog sistema za izdvajanje korisnog audio signala u prisustvu interferencija. Predložena je metoda za prostorno izdvajanje zvučnog signala iz određenog smera nailaska. Korišćen je linijski mikrofonski niz sačinjen od osam mikrofona, uz hardversku prostorno-vremensku obradu signala u realnom vremenu. Signali prikupljeni sa mikrofona se filtriraju adaptivnim prostornim filtrom čiji se koeficijenti optimizuju u realnom vremenu na hardveru otvorenog koda pomoću Least mean square algoritma. Sistem je testiran pomoću simulacije, kroz koju je pokazano da je moguće izdvajanje uskopojasnih i širokopojasnih signala ovom metodom. Cilj ovog rada je sprovođenje eksperimenta u kom se testira algoritam u realnim uslovima. U radu su prikazana ograničenja koja nastaju kada se izdvaja širokopojasni signal u realnim uslovima.

Ključne reči – Adaptivni prostorni filter; Bela hardver; Koristan signal; Mikrofonski niz; Obrada signala;

I. UVOD

Mikrofonski nizovi su sistemi sačinjeni od grupe mikrofona koji pojačavaju signal iz određenog smera i imaju veću usmerenost nego klasični mikrofoni [1]. Njihov princip rada se zasniva na sumiranje signala sa svih mikrofona što rezultira pojačavanjem signala koji dolazi do mikrofonskog niza u njegovoj osi. Moguće je pojačavanje signala koji dolaze do mikrofona iz drugih pravaca uz dodatnu obradu signala. Praktična primena ovakvih sistema je u konferencijskim audio sistemima, gde je potrebno povećati usmerenost ka aktivnom govorniku, a potisnuti signale iz svih drugih pravaca [2]. Još jedna praktična primena mikrofonskih nizova je lokalizacija izvora zvuka pomoću akustičke kamere koja može da izdvoji dominantne izvore zvuka na vizuelnoj slici [3][4].

Glavne karakteristike svakog mikrofonskog niza su oblik njegovog dijagrama usmerenosti i pravac ose maksimalnog zračenja oko koje se formira glavni lob na dijagramu usmerenosti [5]. Ove osobine zavise od prostorne raspodele mikrofona kao i od obrade prikupljenih signala [6]. Oblik dijagrama usmerenosti se može menjati množenjem signala sa kompleksnim koeficijentima. Ovi koeficijenti se drugačije nazivaju koeficijenti prostornog filtra, a množenje njima prostorno filtriranje [5-6]. Algoritmi za optimizaciju koeficijenata prostornog filtra potiču iz teorije antenskih nizova (*array processing*). Primena ovih algoritama na akustičkim signalima je složena jer su ovi signali širokopojasni dok je

frekvencijski opseg radio signala koji se javljaju u antenskim nizovima uskopojasni.

U ovom radu je predložen adaptivni prostorni filter za izdvajanje korisnog akustičkog signala formiranjem glavnog loba dijagrama usmerenosti u pravcu nailaska željenog signala. Koeficijenti prostornog filtra se adaptiraju za svaki odabirak signala koji stiže do mikrofona pomoću LMS (*Least mean square*) algoritma [7-8]. Da bi se algoritmom optimizovali koeficijenti tako da se prostornim filtriranjem izdvoji željeni akustički signal potrebno je unaprediti ga kao što je pokazano u [9]. Umesto jednog koeficijenta po mikrofona, kao kod uskopojasnog prostornog filtra, kod širokopojasnog filtra postoji više koeficijenata takvih da je svaki od njih zadužen za filtriranje određenog frekvencijskog opsega.

Cilj rada je formiranje sistema za izdvajanje korisnog signala adaptivnim prostornim filtrom u realnom vremenu. Ovaj sistem je projektovan kroz implementaciju LMS algoritma na otvorenom hardveru i testiran kroz sprovođenje eksperimenta u realnim uslovima. Koristi se linijski mikrofonski niz sačinjen od osam mikrofona na ekvidistantnim rastojanjima. Koriste se dva izvora od kojih je jedan izvor zvuka korisnog signala, a drugi je izvor interferencije. Glavni pokazatelj uspešnosti realizacije sistema na otvorenom hardveru je eksperiment u kome se koeficijenti filtra za izdvajanje širokopojasnog korisnog signala optimizuju u realnom vremenu. Ovakav sistem bi se mogao jednostavno koristiti u uslovima gde postoji izvor željenog zvuka koji je potrebno izdvojiti iz šuma ometajućih zvukova koji nailaze iz drugih pravaca. Prvi deo rada obuhvata testiranje algoritma kroz simulaciju, gde su korisni signali uskopojasni i širokopojasni muzički signal. Drugi deo rada obuhvata eksperiment gde se koristi hardverska oprema. Filtriranje uskopojasnih signala u realnom vremenu tokom eksperimenta rezultira izdvajanjem korisnog signala. Prostornim filtriranjem, kada je koristan signal muzička sekvenca, se ispituju mogućnosti implementacije ovakvog sistema na otvorenom hardveru.

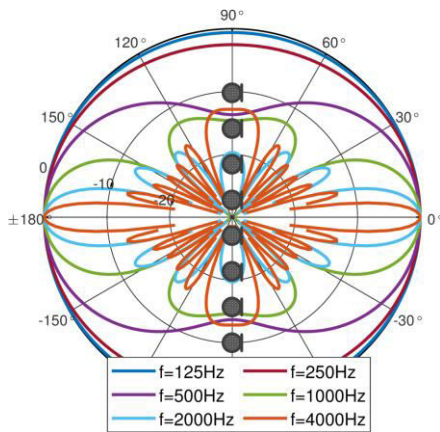
Rad je organizovan u četiri odeljaka, u odeljku dva je predstavljena teorijska osnova mikrofonskih nizova i adaptivnog prostornog filtriranja. Rezultati koji su dobijeni simulacijom i sprovođenjem eksperimenta korišćenjem Bela hardvera [10] su prikazani u odeljku tri. Zaključci istraživanja su prikazani u delu četiri.

II. TEORIJSKA OSNOVA

A. Mikrofonski nizovi

Mikrofonski nizovi su sistemi sačinjeni od više mikrofona koji prikupljaju zvučne signale iz više pravaca. Usmerenost mikrofona (mikrofonskog niza) podrazumeva usmeravanje prostorne karakteristike osetljivosti, odnosno nejednako prikupljanje zvučne energije po svim pravcima [1]. Mikrofonski nizovi predstavljaju jednu vrstu specijalne mikrofonске konstrukcije koja povećava usmerenost, bolje izdvajaju signal iz željenog smera od standardnih mikrofona. Sabiranje komponenti sa mikrofona se dešava u električnom domenu zato je moguće softverskom obradom menjati pravac maksimalne osetljivosti mikrofonskog niza. U zavisnosti od rasporeda mikrofona u prostoru, odnosno geometrije mikrofonskog niza, razlikuju se tri vrste mikrofonskih nizova: linijski, planarni i prostorni mikrofonski nizovi.

U ovom radu je korišćen linijski mikrofonski niz sačinjen od osam omnidirekcionih mikrofona prikazan [11]. Kod linijskih mikrofonskih nizova nije moguće određivanje visine na kojoj se nalazi zvučni izvor, već je usmeravanje moguće samo u horizontalnoj ravni u kojoj se nalazi niz.



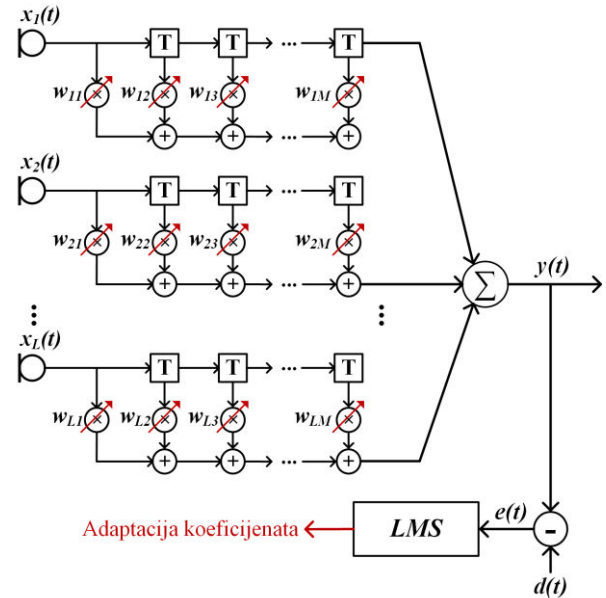
Slika 1. Dijagram usmerenosti mikrofonskog niza.

Dijagram usmerenosti kod mikrofonskih nizova se naziva *beam pattern* [4] i zavisi od frekvencije, prostornog rasporeda mikrofona i koeficijenata prostornog filtra. Na Sl. 1 je prikazan dijagram usmerenosti korišćenog mikrofonskog niza na različitim frekvencijskim opsezima, za elevaciju 90° , dok je po azimutu mikrofonski niz orijentisan kao što je prikazano na slici. Na niskim frekvencijama kao što su 125 Hz i 250 Hz nema usmeravanja. Sa porastom frekvencije se glavni lob sužava, ali se javljaju bočni lobovi. Na višim frekvencijama je usmeravanje veće odnosno glavni lob je už, ali su bočni lobovi veći, što je prikazano narandžastom bojom za frekvenciju 4000 Hz na Sl. 1.

B. Adaptivno prostorno filtriranje

Prostorno filtriranje signala ili *beamforming* se koristi kako bi se izdvojio signal iz željenog pravca. Obradom signala sa mikrofonskog niza moguće je izdvajati akustički signal iz željenog pravca, odnosno usmeravati glavni lob dijagrama usmerenosti. Glavni nedostatak *beamforming*-a je da je usmeravanje moguće samo u ograničenom frekvencijskom

opsegu [3]. Na nižim frekvencijama razmak između mikrofona mora biti isuviše velik da bi usmeravanje loba bilo moguće. Dok se na visokim frekvencijama javlja problem *aliasing*-a. Adaptivni algoritam za usmeravanje mikrofonskog niza je baziran na treniranju niza koeficijenata adaptivnog filtra na osnovu predefinisanoг željenog signala. U svakoj iteraciji optimizacionog algoritma poredi se signal dobijen filtriranjem signala sa mikrofona koeficijentima iz prethodne iteracije sa željenim signalom. Na osnovu toga se definišu novi koeficijenti adaptivnog filtra. Ako se željeni signal javlja u isto vreme kada i interferirajući signali filtriranjem signala sa mikrofona optimizovanim filtrom dijagram usmerenosti mikrofonskog niza se okreće ka pravcu nailaska željenog signala.



Slika 2. Blok šema adaptacije koeficijenata prostornog filtra.

U ovom radu je kao optimizacioni algoritam korišćen LMS (*Least Mean Square*) [12]. Audio signali na mikrofonskom nizu su širokopolasni, odnosno kašnjenje signala koje se javlja između mikrofona nije manje od recipročne vrednosti širine spektra posmatranog signala. Prostorno filtriranje širokopolasnih signala je složenije nego filtriranje uskopojasnih signala gde se signal sa jednog mikrofona množi jednim koeficijentom prostornog filtra. Širokopolasno prostorno filtriranje podrazumeva da se signal sa svakog mikrofona kasni i množi sa više koeficijenata adaptivnog filtra. Na Sl. 2 je prikazana principna blok šema LMS adaptivnog prostornog filtra, broj koeficijenata filtra je $L \times M$, gde je L broj mikrofona, a M broj linija za kašnjenje odnosno koeficijenata u jednoj grani filtra. Veći red filtra obezbeđuje preciznije filtriranje zato što se uži frekvencijski opsezi se filtriraju pojedinačnim koeficijentima. Koeficijenti prostornog filtra, $w_{i,j}$, se adaptiraju u svakoj iteraciji algoritma i menjaju se tako da nakon filtriranja rezultatni signal, y , bude što sličniji željenom signalu, d .

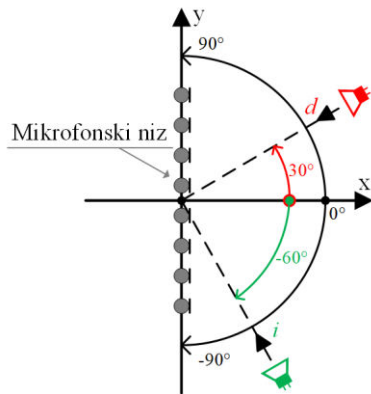
III. METODOLOGIJA

Ovaj rad je podeljen a dve celine, jedna podrazumeva testiranje metode za izdvajanje zvuka iz željenog smera kroz

simulaciju. Gde se ispituju karakteristike mikrofonskog niza, testira algoritam na različitim signalima i definišu optimalni rezultati kojima se teži kroz hardversku implementaciju. Drugi deo ovog rada obuhvata implementaciju algoritma na otvorenom hardveru i sprovođenju eksperimenta sa hardverskom opremom.

A. Simulacija

Testiranje sistema je zamišljeno kroz jednostavnu situaciju gde postoje dva izvora zvuka, jedan izvor reprodukuje željeni signal koji je potrebno izdvojiti, a drugi interferirajući signal koji je poželjno što više potisnuti. Pozicije izvora signala se nalaze u horizontalnoj ravni u kojoj je mikrofonski niz, tačnije elevacija je jednaka 90° , dok se po azimutu izvori zvuka mogu locirati u opsegu od -90° do 90° . Koordinatni sistem kojim se opisuje položaj izvora i prijemnika zvuka je prikazan na Sl. 3. Gde je slikovito prikazan jedan primer položaja zvučnih izvora, zelenom bojom je prikazan izvor interferencije, i , i ugao od -60° koji opisuje pravac iz koga dolazi signal. Crvenom bojom je prikazan izvor korisnog signala, d , koji je potrebno izdvojiti i njegova pozicija koja je jednaka azimutu od 30° .



Slika 3. Koordinatni sistem i položaj izvora zvuka i mikrofonskog niza.

Kako bi se ispitalo ponašanje sistema na određenim frekvencijama u nekim primerima biran je uskopojasni koristan signal. Nakon analize sistema na određenim frekvencijama algoritam je testiran sa akustičkim širokopojasnim signalima. Naredni deo simulacije obuhvata deo gde se bira red adaptivnog prostornog filtra, vrednost koraka adaptacije za LMS algoritam, kao i broj iteracija za koji se očekuje da se izdvoji koristan signal. Hardverska implementacija zahteva što manji red adaptivnog filtra zbog ograničenog vremena izvršavanja. Zato je bitno jasno definisati koji je najmanji red filtra za koji algoritam daje optimalne rezultate za određenu poziciju zvučnih izvora.

B. Postavka eksperimenta

Drugi deo ovog rada je hardverska implementacija ovog algoritma za usmeravanje mikrofonskog niza. Testirani su slučajevi kada je koristan signal uskopojasni i širokopojasni. Za filtriranja signala FIR filtrom kao i računanje koeficijenata adaptivnog filtra u svakoj iteraciji potrebno je čuvati veliki broj informacija i vreme izvršavanja predstavlja kritičnu vrednost kod implementacije ovakvog algoritma na hardveru [13]. Zato se koriste cirkularni baferi gde se čuva N prethodnih odbiraka,

koje treba množiti tokom filtriranja, gde N predstavlja red filtra. Eksperimentalna postavka je prikazana na Sl. 4, kao izvori korisnog i interferirajućeg zvuka su korišćeni zvučnici JBL model LSR6325P-1 [14]. Kao i u simulaciji sistem za izdvajanje korisnog signala je testiran za uskopojasne i širokopojasne korisne signale, dok je interferencija beli Gausov šum. Odnos snaga korisnog i signala i interferencije je -10 dB. Mikrofonski niz se nalazi na mehaničkom držaču i napaja se pomoću pretpojačavača preko koga su mikrofoni povezani sa hardverom za obradu podataka u realnom vremenu. Ulazni signali se čitaju, filtriraju i na osnovu toga se adaptiraju koeficijenti filtra za naredni odбирak ulaznih signala.



Slika 4. Postavka eksperimenta

C. Bela procesor

Bela je hardver korišćen tokom eksperimenta za čitanje signala sa mikrofona, kao i prostorno filtriranje i adaptaciju koeficijenata. Ovo je hardver otvorenog koda koji je specijalizovan za rad sa audio signalima i sensorima [10][15]. Glavna prednost ovog hardvera je malo kašnjenje što omogućava obradu audio signala u realnom vremenu kao i detektovanje i reprodukciju zvuka. Kada je potrebno detektovati zvuk sa više od dva izvora, kao što je slučaj u ovom radu, potrebno je koristiti dodatnu opremu odnosno audio ekspander. Pomoću audio ekspandera i povezivanja pinova za analogne i audio ulaze je omogućeno čitanje audio signala sa osam ulaza. Za usmeravanje dijagrama usmerenosti mikrofonskog niza korišćenog u ovom radu koristiti se osam analognih ulaza što znači da je frekvencija odabiranja sa kojom se prikupljaju podaci 22.05 kHz.

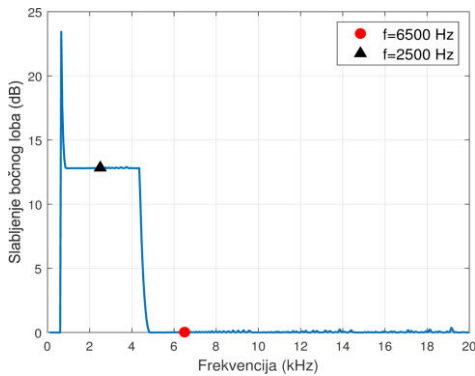
IV. REZULTATI

A. Rezultati simulacije

Prvi deo simulacije obuhvata ispitivanje ograničenja korišćenog mikrofonskog niza. Analizom pozicije i nivoa bočnih lobova se definišu ograničenja mikrofonskog niza. Na Sl. 5 je prikazano slabljenje glavnog bočnog loba u zavisnosti od frekvencije signala. Na ovoj slici se zapaža da potiskivanje bočnog loba postoji u frekventijskom opsegu od 650 Hz do 4850 Hz, dok na ostalim frekvencijama potiskivanja nema. Na niskim frekvencijama, do 650 Hz, nema bočnih lobova odnosno nema usmeravanja, jer je talasna dužina mnogo veća od razmaka između mikrofona.

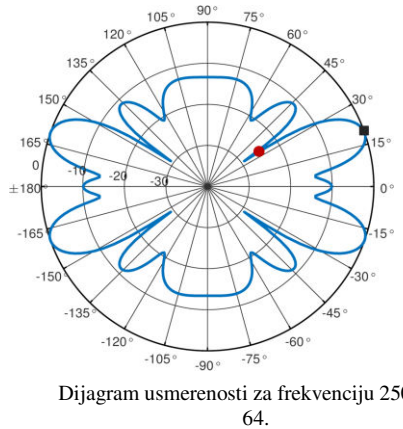
Prvi koristan signal koji je korišćen u simulaciji je sinusni signal na frekvenciji 2500 Hz, ova frekvencija spada u opseg frekvencija gde su bočni lobovi dobro potisnuti. Pozicije na kojima se nalaze izvori signala su po elevaciju 90° , a po azimutu koristan signal se nalazi na 20° , dok je interferirajući signal na poziciji 35° . Pozicije su izabrane tako da izvori budu

blizu jedan drugog radi testiranja algoritma. Algoritam je testiran za red filtera 64 i 128, za obe vrednosti redova filtera dobijeni su slični rezultati.

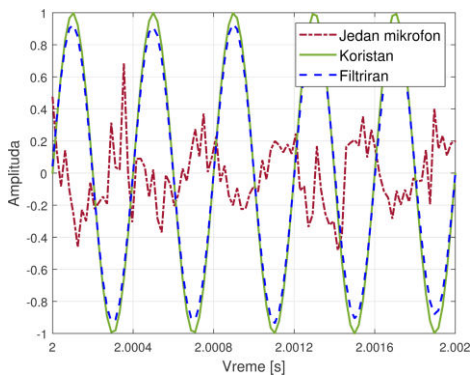


Slika 5. Slabljenje glavnog bočnog loba.

Na Sl. 6 je prikazan dijagram usmerenosti za red filtera 64, na frekvenciji 2500 Hz, što je frekvencija korisnog signala koji je potrebno izdvojiti. Crnim kvadratom je označen glavni lob na dijagramu usmerenosti koji odgovara poziciji na kojoj se nalazi izvor korisnog signala, 20° po azimutu. Crvenom tačkom je označeno koliko je potisnut interferirajući signal koji ima koordinate po azimutu 35°, slabljenje interferirajućeg signala je 24 dB.



Slika 6. Dijagram usmerenosti za frekvenciju 2500 Hz, red filtera 64.

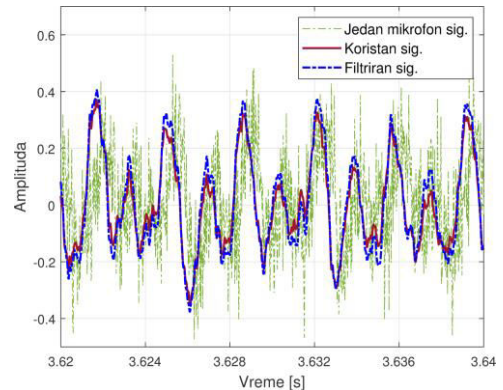


Slika 7. Uvećan prikaz vremenskih oblika korisnog (sinusoida), filtriranog i signala sa jednog mikrofona

Nakon prikaza dijagrama usmerenosti koji se računaju direktno iz koeficijenata prostornog filtera poželjno je filtrirati signale sa svih mikrofona koeficijentima filtera izračunatim u

poslednjoj iteraciji algoritma. Na Sl. 7 su prikazani isečci vremenskih oblika signala za primer korisnog signala frekvencije 2500 Hz. Crvenom linijom je prikazan signal sa jednog mikrofona i sličnog su oblika signali sa ostalih sedam mikrofona. Zelenom punom linijom je predstavljen koristan signal koji želimo izdvojiti nakon prostornog filtriranja. Plavom isprekidanom linijom je predstavljen filtrirani signal, odnosno kada se signali sa svih mikrofona filtriraju dobije se prostoperiodičan signal koji je približno isti kao i koristan signal. Sa Sl. 7 se vidi da je simulacijom prostornog filtriranja sinusni signal frekvencije 2500 Hz uspešno odvojen od interferirajućeg signala.

Audio signali kao što su govor i muzika su širokopojasni i potrebno je testirati algoritam na takvim signalima. Testiranje algoritma za ovakve korisne signale je potrebno da bi se ispitala mogućnost korišćenje predloženog sistema u realnim situacijama gde je poželjno odvojiti koristan signal od smetnje koja dolazi iz drugog smera. Algoritam je testiran kada je koristan signal muzička sekvenca, a interferencija je beli Gausov šum. Kod širokopojasnih signal red filtera mora biti veći nego kod uskopojasnih signala da bi se filtriranjem signala sa mikrofona dobio što sličniji signal željenom signalu. U testiranju metode kroz simulaciju red filtera ne predstavlja ograničavajući faktor, ali kod implementacije na hardveru potrebno je smanjiti red filtera što je više moguće.



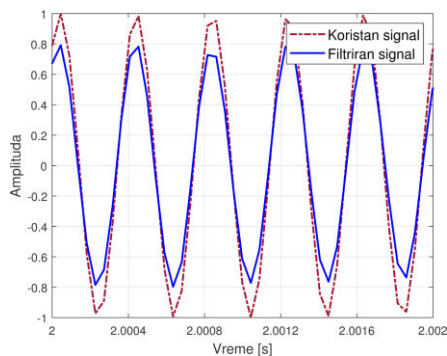
Slika 8. Uvećan prikaz vremenskih oblika korisnog (muzička sekvenca), filtriranog i signala sa jednog mikrofona

Na Sl. 8 je prikazan isečak vremenskog oblika filtriranog signala, korisnog signala koji je cilj izdvojiti i signala sa jednog mikrofona. Plavom isprekidanom linijom je predstavljen signal dobijen filtriranjem signala sa svakog mikrofona odgovarajućim filtrom, zatim sabiranjem takvih signala i normalizacijom. Crvenom punom linijom je prikazana muzička sekvenca koju je potrebno izdvojiti iz zbirnog signala. Ukoliko se uporede ove dve krive vidi se da filtrirani signal dobro prati koristan, odnosno iz signala koji je oblika kao signal prikazan zelenom bojom filtriranjem se uspešno izdvaja željeni signal.

B. Rezultati eksperimenta

Prvi signal nad kojim je testiran algoritam je prostoperiodičan sinusni signal frekvencije 2500 Hz. Pozicije koje su izabrane su za koristan signal 20° azimut, a 35° azimut za beli Gausov šum. Eksperiment za ove signale je sproveden dva puta: jednom za red adaptivnog filtera 64, a drugi put za red 128. Potiskivanje signala iz pravca nailaska interferencije je

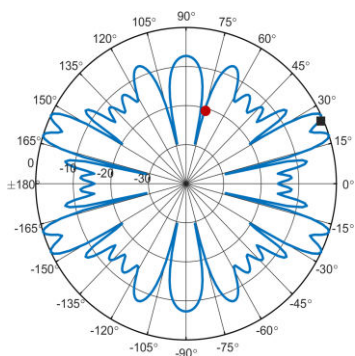
25 dB odnosno 15 dB, respektivno. Na Sl. 9 je prikazan isečak vremenskog domena korisnog signala (crvena isprekidana linija) i filtriranog signala (plava puna linija) kada je red filtra 64. Zapaža se da nivo filtriranog nije kao nivo korisnog signala što se može pripisati grešci koja nastaje pri normalizaciji signala na najveću vrednost, jer se javljaju određeni pikovi koji su većeg nivoa nego ostatak signala.



Slika 9. Vremenski oblik korisnog (sin) i filtriranog signala.

Adaptacija prostornog filtra u realnom vremenu je testirana za još jedan sinusni signal na višoj frekvenciji od 6500 Hz. Za testiranje algoritma u realnom vremenu izabrane su pozicije izvora 25° azimut za korisni signal odnosno 75° azimut interferirajućeg signala. Odnos snage korisnog i interferirajućeg signala je -3 dB.

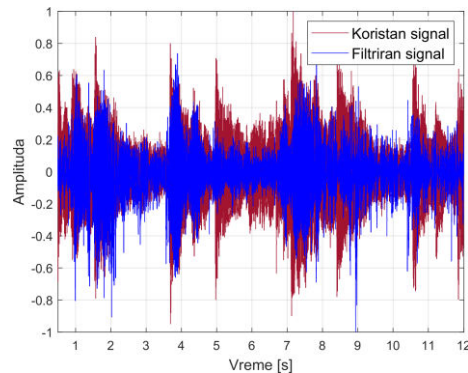
Na Sl. 10 je prikazan dijagram usmerenosti za ovaj primer, gde je red adaptivnog filtra je 128. Na dijagramu usmerenosti se vidi da je signal koji dolazi do mikrofonskog niza iz pravca izvora interferirajućeg signala potisnut za približno 20 dB, a da se na dijagramu usmerenosti formira maksimum na 25° odakle nailazi koristan signal. Kroz ovaj primer je pokazano da algoritam dobro izdvaja uskopojasni signal iako je njegova frekvencija iz opsega gde su izraženi bočni lobovi na dijagramu usmerenosti, što se vidi sa Sl. 5.



Slika 10. Dijagram usmerenosti za frekvenciju 6500 Hz (eksperiment)

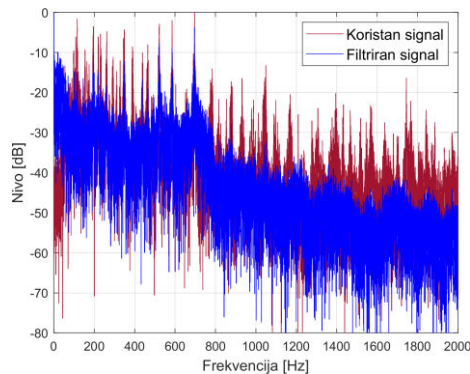
Drugi deo testiranja adaptivnog prostornog filtriranja u realnom vremenu se odnosi na primenu nad širokopojasnim signalima. Koristan signal je kao i u simulaciji sekvenca muzičkog signala, dok je interferirajući signal beli Gausov šum. Algoritam je testiran za različite odnose korisnog signala i interferencije. Položaj izvora korisnog signala je 30° po azimutu, a šum -15°. Snaga korisnog signala i interferencije je menjana kroz eksperiment kako bi se posmatralo da li se

povećavanjem snage korisnog signala dobija bolje filtriranje. Na Sl. 11 je prikazan vremenski oblik filtriranog i korisnog signala koji je potrebno izdvojiti, red filtra je 200 i odnos snaga korisnog signala i interferencije je -4 dB. Ovo je maksimalni red filtra koji je moguće postići kod implementacije ovog algoritma u realnom vremenu.



Slika 11. Vremenski oblik korisnog muzičkog signala i filtriranog signala (eksperiment).

Filtrirani signal prati promene po amplitudi koje su izražene kod korisnog signala. Za drugačije odnose snaga korisnog i interferirajućeg signala se dobija slično rešenje, na nekim delovima je filtrirani signal sličniji korisnom, dok se na drugim više razlikuje od korisnog signala. Potrebno je značajno više povećati red filtra i onda analizirati uticaj reda filtra na ovaj sistem opisan kroz eksperiment. Povećanje reda filtra nije moguće ukoliko se koristi Bela hardver.



Slika 12. Spektar korisnog muzičkog signala i filtriranog signala.

Na Sl. 12 je prikazan spektar muzičke sekvence koja je korišćena kao koristan signal i spektar filtriranog signala. Ova muzička sekvenca ima izražene komponente na nižim frekvencijama. Zato ovaj sistem za izdvajanje signala iz željenog smera može do određene mere filtriranjem uspešno da izdvoji muzičku sekvencu. Takođe se vidi da spektar filtriranog signala do 800 Hz prati oblik spektra korisnog signala. Zbog poklapanja frekvencijskog opsega filtriranog i korisnog signala na niskim frekvencijama filtrirani prati oblik korisnog signala u vremenskom domenu. Na višim frekvencijama nivo filtriranog signala je 10 do 20 dB manji od nivoa korisnog signala što rezultira nedovoljno dobrim poklapanjem ova dva signala u vremenskom domenu.

Kroz ovaj primer testiranja algoritma u realnim uslovima je pokazano da realizacija prostornog adaptivnog filtra na Bela

hardveru nije dovoljno dobra. Ograničenja koja rezultiraju maksimalnim redom filtra su ograničavajući faktor. Broj koeficijentata direktno utiče na širinu frekventijskog opsega koji se filtrira svakim koeficijentom, što nije dovoljno. U simulaciji je širokopojasni signala uspešno izdvojen sa korišćenim redovima filtara, ali se u realnim uslovima javljaju pored interferirajućeg signala i ambijentalna buka, kao i refleksije korisnog signala i interferencije. Zbog ovih dodatnih komponenti koje potiču iz svih pravaca potrebni su veći redovi prostornog adaptivnog filtara.

V. ZAKLJUČAK

Kroz ovaj rad je prikazana realizacija sistema za izdvajanje signala iz željenog smera u realnom vremenu. Korišćen je linijski mikrofonski niz sačinjen od osam mikrofona, kao i Bela hardver. Izdvajanje korisnog signala je realizovano kroz filtriranje signala prostornim adaptivnim filtrom. Adaptivni algoritam koji je korišćen je LMS gde se koeficijenti filtra adaptiraju u svakoj iteraciji algoritma. Sistem je testiran kroz simulaciju i kroz eksperiment, odnosno implementaciju algoritma na hardveru.

Kroz simulaciju je pokazano da adaptivnim prostornim filtriranjem može da se potisne interferencija i izdvoji koristan signal. Red adaptivnog filtra u ovakvoj situaciji nije ograničavajući faktor jer se koeficijenti ne adaptiraju u realnom vremenu. Za testiranje sistema za izdvajanje korisnog signala korišćeni su različiti korisni signali dok je interferencija u svim primerima beli Gausov šum. Zaključuje se da je izdvajanje uskopojasnog signala moguće bez obzira na izabran red filtra. Kroz simulaciju je takođe pokazano da je izdvajanje širokopojasnih signala uspešno.

Glavni deo ovog rada podrazumeva realizaciju sistema za izdvajanje željenog signala na otvorenom hardveru. Hardver koji je izabran je Bela, zbog pristupačne cene, DSP procesora i frekvencije odabiranja dovoljne za rad sa audio signalima. Korisni signali koji su reprodukovani su: uskopojasni signali muzička sekvenca. Testiranje algoritma za uskopojasne signale kroz eksperiment je uspešno. Kroz eksperiment je testirano izdvajanje širokopojasnog korisnog signala odnosno muzičke sekvence. U ovom primeru je u određenoj meri izdvojen koristan signal, odnosno filtriran signal prati oblik korisnog signala. Frekventijski opseg do 800 Hz filtriranog i korisnog signala se poklapaju što je dovoljno da koristan signal bude delimično izdvojen filtriranjem. Širok frekventijski opseg signala u realnim uslovima gde je prisutna ambijentalna buka i refleksije rezultiralo je nedovoljno dobrom adaptacijom koeficijentata. Maksimalni red filtra koji je moguće implementirati na Beli je 200 što za ovaj primer nije bilo dovoljno. Povećavanjem reda filtra iznad ograničenja hardvera bi se potencijalno dobio bolji rezultat. Takođe smanjivanjem ambijentalne buke i smanjivanjem refleksija bi se uticalo na rezultate filtriranja. Pokazano da je moguće izdvajanje korisnog širokopojasnog signala ovim algoritmom, ali je potrebno poboljšanje da bi ova metoda dovoljno dobro funkcionisala i našla primenu u sistemima koji rade u realnim uslovima.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, pod brojem ugovora 451-03-47/2023-01/200103.

LITERATURA

- [1] M. Mijić, „Audio sistemi“, Akademska misao, Beograd, 2011.
- [2] Y. Tamai, S. Kagami, H. Mizoguchi, K. Sakaya, K. Nagashima, T. Takano, „Circular Microphone Array for Meeting System, Sensors“, vol. 2, pp. 1100 - 1105, 2003.
- [3] M. Eric, „Some Research Challenges of Acoustic Camera“, 19th Telecommunications Forum TELFOR, 22-24 Nov. 2011, Belgrade, Serbia, pp. 1036 – 1039.
- [4] Henry E. Heffner and Rickye S. Heffner, „The Evolution of Mammalian Sound Localization“, Department of Psychology, University of Toledo.
- [5] M. Erić, N. Vukmirović, „Uvod u obradu signala sa antenskih nizova“, Akademska misao, Beograd, 2019.
- [6] H. L. Van Trees, „Optimum Array Processing“, John Wiley and Sons, New York, USA, 2002.
- [7] S. Haykin, „Adaptive Filter Theory“, Prentice Hall, New Jersey, USA, 2002.
- [8] B. Widrow, J.M. McCool, M. Larimore, C.R. Johnson, „Stationary and nonstationary learning characteristics of the LMS adaptive filter“, Proceedings of the IEEE, Vol. 64, No. 8, 1976, pp. 1151 – 1162.
- [9] M. Bjelić, M. Stanojević, „Comparison of LMS Adaptive Beamforming Techniques in Microphone Arrays“, Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol. 12, No. 1, Feb. 2015, 1-16.
- [10] McPherson and V. Zappi, “An environment for submillisecond latency audio and sensor processing on BeagleBone Black,” Proc. Audio Engineering Society Convention 138, 2015, pp. 1-7.
- [11] M. Bjelić, M. Stanojević, „Određivanje pravca nailaska pomoću mikrofonskog niza na osnovu vremenskih kašnjenja“, 58. ETRAN konferencija, 2-5. jun 2014., Vrnjačka banja, Srbija.
- [12] W. Liu, „Wideband Beamforming“, John Wiley and Sons, New York, USA, 2002.
- [13] Mitra, Sanjit K. „Digital Signal Processing: A Computer Based Approach“, New York: McGraw-Hill, 1998.
- [14] Datasheet i tehnička dokumentacija proizvođača dostupna na: <https://jblpro.com/en/products/lsr6325p-1>, (30.08.2023.)
- [15] Bela Knowledge Base, Dostupno na: <https://learn.bela.io/> (04.09.2023.)

ABSTRACT

An important engineering problem in the field of acoustics is the realization of a simple system for extracting useful audio signals in the presence of interferences. A method for spatially extracting signals from the direction of sound incidence is proposed. A microphone array was used with space-time signal processing executed in real time on hardware. The microphone signals are filtered by an adaptive filter which is optimized in real time using the Least Mean Square algorithm. Testing the system through simulation showed that extracting narrowband and wideband signals using the presented adaptive spatial filtering method is theoretically possible. This paper aims to experimentally test the algorithm under real-world conditions, as well as show the limitations of extracting wideband signals.

Realization of adaptive beamformer on open-source hardware

Marija Ratković, Miloš Bjelić