

# Realizacija zvučnog sistema sa softverskom kontrolom usmerenosti

Miloš Bjelić, Aleksandar Golubović, Miomir Mijić

**Apstrakt**— Usmereni zvučni izvori predstavljaju nezaobilazan element u realizaciji audio sistema, bilo da se radi o otvorenom ili zatvorenom prostoru koji je potrebno ozvučiti. U ovom radu prikazan je jedan usmereni zvučni izvor, čiju je usmerenost moguće kontrolisati softverski, a ne hardverski, što je slučaj kod većine dostupnih rešenja na tržištu. Zvučnički sistem se sastoji od 12 zvučnika i procesora sa isto toliko izlaza, koji omogućava nezavisnu obradu signala za svaki zvučnik ponaosob. U radu je prikazan algoritam za prostorno-vremensku obradu signala koji omogućava upravljanje dijagramom usmerenosti u vertikalnoj ravni. Algoritam je implementiran na dva različita procesora i pokazano je da se oba procesora mogu koristiti za ovu namenu. Verifikacija rada celokupnog sistema izvršena je merenjem dijagrama usmerenosti zvučnog niza u anehoičnim uslovima. U radu su prikazani i potencijalni problemi koji se mogu javiti prilikom korišćenja ovakvih sistema i načini da se ti problemi prevaziđu.

**Ključne reči**— algoritmi, obrada signala, hardverska implementacija, softverska kontrola, usmerenost, zvučnički niz.

## I. UVOD

Zvučnički sistemi koji se koriste u sistemima za ozvučavanje treba da prenesu zvučni sadržaj do slušalaca koji se nalaze u određenom delu prostora. Zvučna energija koja odlazi u deo prostora na kome nema slušalaca na otvorenom prostoru predstavlja gubitak, a u prostorijama ima negativne posledice na percepciju zvuka jer dodatno pobuđuje reverberacioni proces [1]. Zbog toga se u sistemima za ozvučavanje koriste usmereni zvučnički sistemi da bi se najveći deo zvučne snage slao u prostor gde se nalaze slušaoci. Usmereni zvučnički sistemi podrazumevaju da se grupa zvučnika nalazi na jednoj lokaciji i koncentrisani u jedinstven sistem. U ovu grupu zvučničkih sistema, na primer, spadaju takozvani *Line array* sistemi, kod kojih se usmerenost postiže tako što je zvučnička skupina zakrivljena, to jest pojedinačni zvučnici se nalaze na različitim udaljenostima od mesta prijema.

Realizovani zvučnički niz koji je predmet ovog rada spada u grupu usmerenih zvučnih izvora i sastoji se od grupe zvučnika postavljenih u nizu. Kod ovakvog sistema usmeravanje se ne vrši fizičkim pomeranjem u prostoru pojedinačnih zvučnika u zvučničkoj skupini, kao kod standardnih *Line array* sistema, već odgovarajućom predobradom signala, dok se zvučnici nalaze nepomični u duž fiksne ose. Svaki od zvučnika u ovom zvučničkom nizu

ima nezavisno pretprocesiranje signala i pojačanje. Time je omogućeno da se kontroliše usmerenost sistema u celini.

Glavna prednost ovakvog sistema u odnosu ostale usmerene zvučničke sisteme je u tome što se kontrola usmerenosti ostvaruje bez fizičkog pomeranja zvučnika i podešavanja uglova između njih. Druga prednost je to što se može postići veća usmerenost, odnosno bolje pokrivanje auditorijuma sa istim brojem zvučnika. Treća prednost ovakvog sistema je u tome što se usmerenost i dobro pokrivanje mogu ostvariti sa manjim fizičkim dimenzijama sistema u odnosu na *Line array* sisteme. Najzad, četvrta prednost je u tome što se modifikacije sistema vrše softverskim izmenama bez bilo kakvih hardverskih promena i pomeranja pojedinačnih zvučnika. Na taj način promene je moguće uvoditi i daljinski, preko namenske mreže ili preko Interneta.

Zvučnički stubovi sa ugrađenim pojačavačima i procesorom za predobradu signala predstavljaju osnovni element u savremenom konceptu ozvučavanja kako na otvorenom, tako i u zatvorenom prostoru. Ovakvi zvučnički sistemi su komercijalno dostupni, ali modeli koji se nude na tržištu su zatvoreni, i u njima se ne može sagledati unutrašnja logička struktura pripreme signala. Njihovi proizvođači ne dozvoljavaju uvid u rad sistema niti mogućnost samostalnog unapređivanja kroz implementaciju naprednih algoritama za obradu audio signala. To znači da sisteme koji se mogu nabaviti na tržištu nije moguće modifikovati i unapređivati, što sa istraživačkog aspekta predstavlja ograničenje. U literaturi postoje osnovne naznake o funkcionisanju takvih zvučničkih sistema, ali ne i detaljniji opisi. Uz to, cena takvih sistema je veoma visoka. Zbog toga je izrada ovakvog zvučničkog sistema istraživačko-razvojni zadatak.

U ovom radu fokus će biti na algoritmu za kontrolu dijagrama usmerenosti zvučničkog niza i njegovoj implementaciji na dva procesora različite namene i arhitekture. Jedan proces je multifunkcionalni procesor koji se koristi u audio sistemima pa je implementacija algoritama ograničena postojećim elementima na procesoru. Drugi procesor predstavlja *open source* sistem za obradu audio signala sa malim vremenom latencije, koji se može programirati u skladu sa željama korisnika. Osnovna ideja je da se uporede ova dva sistema sa stanovišta implementacije algoritma za softversku kontrolu dijagrama usmerenosti i ispita mogućnost korišćenja *open source* rešenja za tu namenu.

Rad je organizovan kako sledi. U drugom poglavlju prikazani su zvučnički niz, algoritam za prostorno-vremensku obradu signala i procesori koji će biti korišćeni za implementaciju algoritama. U trećem poglavlju prikazani su rezultati i njihova diskusija. U poslednjem poglavlju izneti su zaključci.

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

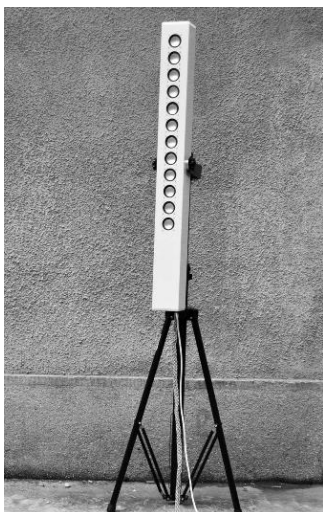
Aleksandar Golubović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: gal60477d@student.etf.bg.ac.rs).

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

## II. METODOLOGIJA

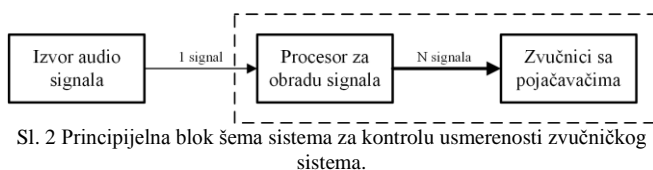
### A. Zvučnički niz

Zvučnički niz koji posmatramo u ovom radu se sastoji od 12 zvučnika tipa *Genius SP-D150* sa pratećim pojačavačima i kutije u koju su smešteni zvučnici i pojačavači. Pojačavači se napajaju iz jednosmernog izvora za napajanje napona 9 V. Frekvencijska karakteristika jednog zvučnika koji je ugrađen u sistem je približno ravna na frekvencijama većim od 300 Hz. Pojačavači zvučnika su podešeni tako da vrednost nivoa zvuka na izlazu iz zvučnika bude ista za sve zvučnike kada nema obrade signala. Zvučnički niz je realizovan u Laboratoriji za Akustiku Elektrotehničkog fakulteta [2]. Na Slici 1 prikazan je izgled zvučničkog niza.



Sl. 1 Izgled korišćenog zvučničkog niza sa 12 zvučnika.

Principijelna blok šema sistema za kontrolu dijagrama zračenja zvučničkog niza prikazana je na Slici 2. Sistem se sastoji iz dva dela, multifunkcionalni procesor na kome se implementira algoritam za obradu signala i samog zvučničkog niza. Signal se iz izvora audio signala vodi se na ulaz procesora. U procesoru se ulazni signal multiplificira 12 puta i svaka kopija se dalje nezavisno procesira i prosleđuje na odgovarajući pojačavač, a odatle na zvučnik.



Sl. 2 Principijelna blok šema sistema za kontrolu usmerenosti zvučničkog sistema.

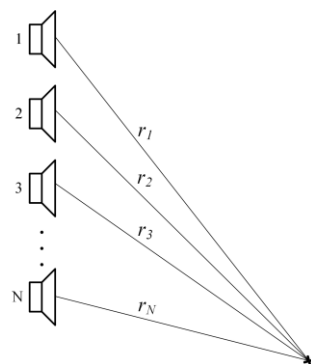
Isprekidanom linijom na Slici 2 označena je kutija zvučničkog niza. U komercijalnim rešenjima uobičajno je da se procesor nalazi u kutiji sa zvučnicima, pojačavačima i napajanjem, međutim u ovom radu korišćen je koncept da je procesor odvojen od zvučničkog niza. Razlozi su pre svega praktični, manja dimenzija kutije.

### B. Algoritam za prostorno-vremensku obradu signala

Ukoliko se u procesoru signala ne izvrši obrada signala već samo kreiranje 12 kopija ulaznog signala, dobija se dijagram usmerenosti koji je posledica geometrije niza, odnosno linijskog izvora. Maksimum dijagrama usmerenosti odgovara osi normalnoj na osu na kojoj se nalaze zvučnici.

Pomeranje dijagrama usmerenosti u neki drugi pravac

realizuje se obradom signala pre reprodukcije [3]. Na Slici 3 prikazana je tačka u prostoru u koju se želi dobiti maksimum dijagrama usmerenosti. Rastojanja između pojedinačnih zvučnika i posmatrane tačke su različita, pa će i pristizanje zvuka od pojedinačnih zvučnika biti različito. To za posledicu ima razliku u fazama signala, pri čemu će se oni, nakon njihovog sabiranja u toj tački, delimično poništavati. Da bi se obezbedilo konstruktivno sabiranje signala, njihove faze moraju biti jednake u posmatranoj tački. To se postiže tako što se na osnovu razlike rastojanja između pojedinačnih zvučnika i najudaljenijeg zvučnika izračunavaju vremenska kašnjenja signala.



Sl. 3 Princip usmeravanja zvučničkog niza.

Kašnjenja se potom veštački kompenzuju u procesoru signala, tako da se u datoj tački signali koji dolaze od pojedinačnih zvučnika sabiraju u fazi. Najbliži zvučnik ima najveću vrednost veštački unetog vremenskog kašnjenja, dok je za najudaljeniji zvučnik to kašnjenje jednako 0. Vrednosti kašnjenja za pojedinačne zvučnike dobijaju se na osnovu sledeće jednačine:

$$\tau_j = \frac{r_{max} - r_j}{c}, \quad (1)$$

gde indeks  $j$  predstavlja redni broj zvučnika,  $r_{max}$  predstavlja rastojanje od posmatrane tačke do najudaljenijeg zvučnika,  $r_j$  rastojanje od tačke do svih zvučnika, a  $c$  brzinu prostiranja zvuka u vazduhu. Rastojanje pojedinačnih zvučnika od posmatrane tačke može se izračunati na osnovu sledeće jednakosti:

$$r_j = \sqrt{(x_{jzvučnik} - R \cos(\theta))^2 + (y_{jzvučnik} - R \sin(\theta))^2} \quad (2)$$

gde su  $x_{jzvučnik}$  i  $y_{jzvučnik}$  koordinate pojedinačnih zvučnika,  $R$  poteg od sredine zvučničkog niza do posmatrane tačke, a  $\theta$  ugao koji zaklapa osa normalna na centar zvučničkog sistema i krak koji prolazi kroz posmatranu tačku.

Takođe, pored fazne razlike moguće je izvršiti kompenzaciju i po amplitudi. Najudaljeniji zvučnik će u posmatranoj tački stvarati najmanji nivo signala, pa je potrebno pre reprodukcije pojačati taj signal. Veštački uneta pojačanja srazmerna su rastojanju zvučnika od označene tačke u prostoru. Vrednosti pojačanja izračunavaju se na sledeći način:

$$A_j = \frac{r_j}{r_{min}}, \quad (3)$$

gde je sa  $r_{min}$  i  $r_j$  označeno rastojanje od posmatrane tačke u prostoru do najbližeg, odnosno do posmatranog zvučnika, respektivno.

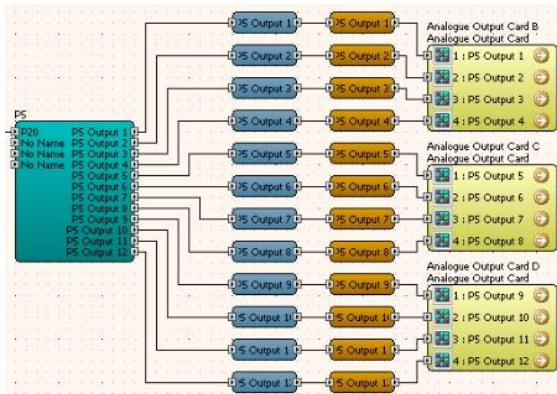
### C. Implementacija algoritma na procesoru BSS Blue 160

BSS Blue 160 London Architect je multifunkcionalni procesor koji ima 4 ulazna i 12 izlaznih modula (kanala). Ovaj uređaj se koristi u audio sistemima koji pre svega zahtevaju modifikacije i nadgradnju. Omogućava jednostavnu realizaciju audio sistema jer se hardverske audio komponente realizuju kroz softverske procedure na samom procesoru. Izgled procesora prikazan je na Slici 4 [4].



Sl. 4 Izgled BSS Blu 160 procesora.

Uređaj se programira pomoću besplatnog softvera u kom je moguće dizajnirati željenu obradu signala. Samu obradu moguće je realizovati isključivo pomoću dostupnih postojećih modula. Neki od postojećih elementa su: elementi za kašnjenje, filtri, elementi za pojačanje, ekvalizeri itd. Za implementaciju opisanog algoritma potrebni su elementi za kašnjenje i elementi za pojačanje. Realizacija algoritma za usmeravanje zvučnickog niza na ovom procesoru signala prikazana je na Slici 5.



Sl. 5 Izgled realizovanog algoritma na BSS Blu 160 procesoru.

Elementima za kašnjenje i pojačanje moguće je menjati vrednosti tako da se postigne pomeranje dijagrama usmerenosti u proizvoljnom pravcu. Algoritam omogućava kontrolisanje nivoa signala sa kojim se vrši reprodukcija kao i selektovanje ulaznog signala koji se reprodukuje. Pored algoritma na procesoru, implementirani su i generator belog šuma i generator sinusnog signala, koji se koriste za testiranje sistema i merenja u kojima se zvučnički sistem koristi kao usmereni izvor.

### D. Implementacija algoritma na procesoru Bela

Bela je integrisan računarski sistem koji je dizajniran za rad sa audio signalima. Bazira se na BeagleBone platformi. Glavna karakteristika ovog sistema je malo vreme latencije pri obradi analognih i audio signala, koje iznosi do 1 ms. Izgled Bela procesora prikazan je na Slici 5 [5]. Bela poseduje po 8 analognih ulaznih i 8 izlaznih modula sa frekvencijom odabiranja od 22.05 KHz. S obzirom da se posmatrani zvučnički niz sastoji od 12 zvučnika u ovom

radu su korišćena dva Bela sistema, od kojih svaki koristi 6 analognih izlaznih kanala. Synchronizacija taktova rada dva sistema je obezbeđena njihovim međusobnim povezivanjem.

Implementacija algoritma za kontrolu dijagrama usmerenosti zvučnickog niza izvršena je pomoću integrisanog razvojnog okruženja koje ovaj sistem poseduje. Razvojno okruženje je otvoreno i bazirano je na programskom jeziku C.



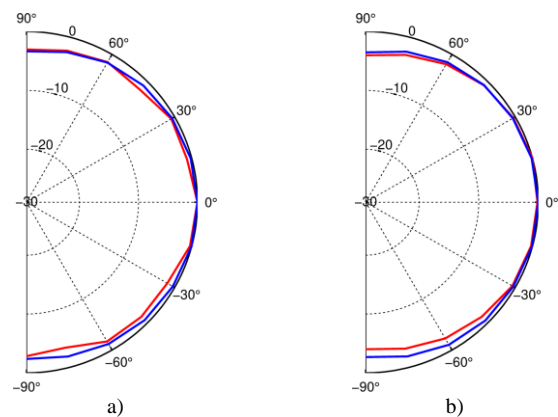
Sl. 6 Izgled Bela procesora.

Prednost ovog sistema za obradu signala u odnosu na prethodno opisani sistem, je u tome što ne postoje ograničenja definisana sa postojećim komponentama, već se obrada realizuje u kodu koji definiše sam korisnik.

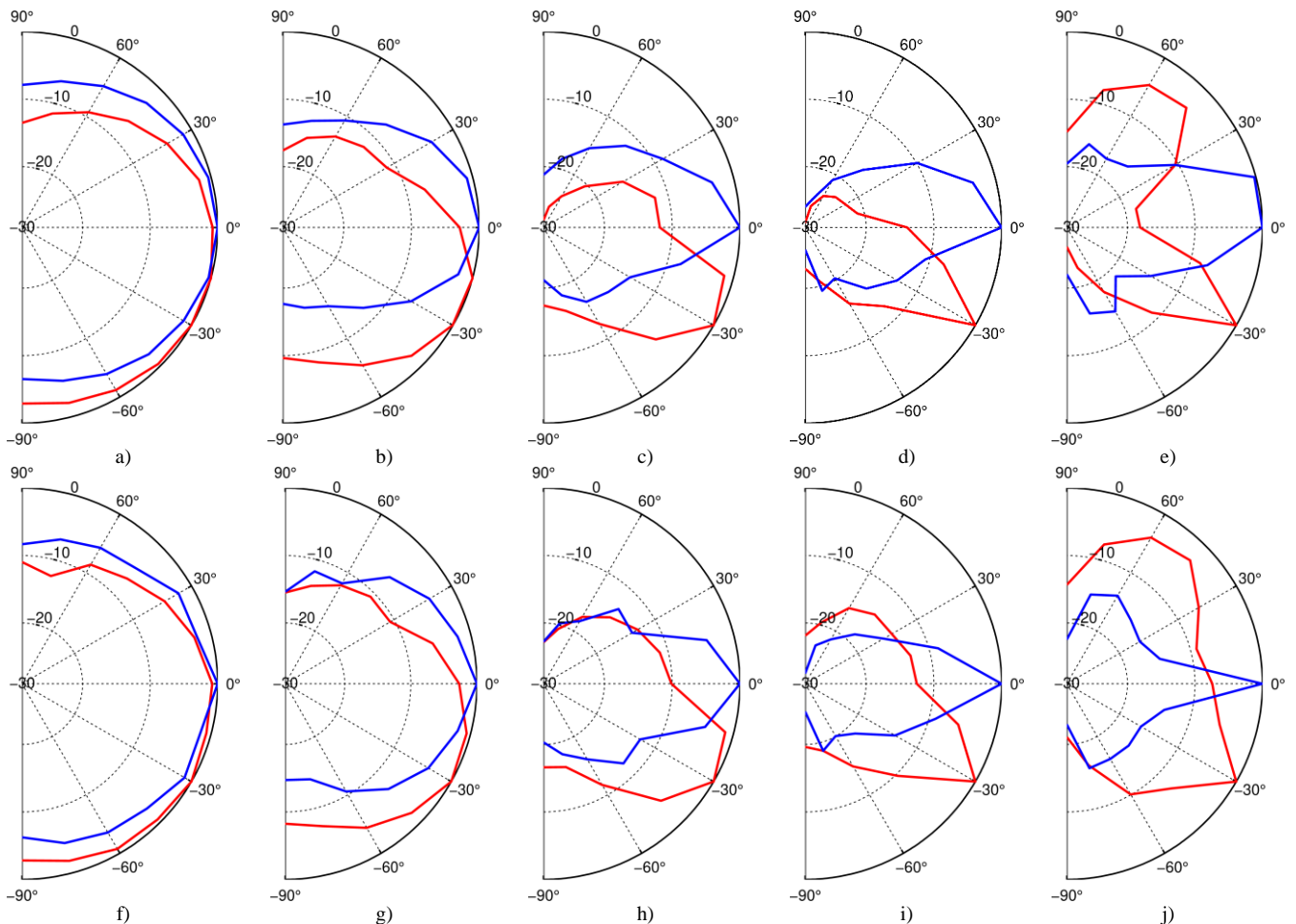
## III. REZULTATI I DISKUSIJA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati merenja dijagrama usmerenosti zvučnickog niza, usmerenog u određenoj tački u prostoru. Usmeravanje je izvršeno algoritmom opisanog u poglavlju 2. Obavljeno je merenje vertikalne i horizontalne usmerenosti sa i bez procesiranja signala, korišćenjem BSS Blu 160 procesora i Bela sistema, za oktavne opsege sa centralnim frekvencijama: 125 Hz, 2000 Hz i 4000 Hz. Kao pobudni signal korišćena je MLS sekvenca [6], a samo merenje izvršeno je neusmerenim mernim mikrofonom [7] u anehoičnim uslovima. Procesiranje je izvršeno tako da se dijagram usmerenosti usmeri u pravcu  $-30^\circ$  u odnosu na ravan u kojoj leži zvučnički stub.

Na Slici 7 prikazani su horizontalni dijagrami zračenja za oba korišćena procesora za obradu audio signala. Na osnovu rezultata merenja može se primetiti da procesiranje signala ne utiče na horizontalnu usmerenost zvučnickog niza. Ovo je posledica toga što su svi zvučnici postavljeni linijski u vertikalnoj ravni.



Sl. 7 Horizontalni dijagrami usmerenosti zvučnickog niza bez (plava boja) i sa (crvena boja) procesiranjem za oktavni opseg 1000 Hz, a) BSS Blu 160 procesoru i b) Bela procesoru



Sl. 8 Vertikalni dijagrami usmerenosti zvučnog niza bez (plava boja) i sa (crvena boja) procesiranjem signala na *BSS Blu 160* procesoru za oktavne opsege a) 250 Hz, b) 500 Hz, c) 1000 Hz, d) 2000 Hz, e) 4000 Hz i procesiranjem signala na *Bela* procesoru za oktavne opsege: f) 250 Hz, g) 500 Hz, h) 1000 Hz, i) 2000 Hz, j) 4000 Hz.

Usmerenost zvučnog niza u vertikalnoj ravni se menja uvođenjem procesiranja signala. Zbog toga je u anehoičnim uslovima izvršeno merenje dijagrama usmerenosti kada nema procesiranja, odnosno kada svi zvučnici reprodukuju isti signal, i u situaciji kada zvučnici iz procesora dobijaju nezavisne signale. Na Slici 8 prikazani su rezultati merenja dijagrama usmerenosti zvučnog niza povezanog na *BSS* i *Bela* procesor.

Uvođenjem procesiranja signala pre reprodukcije na zvučnicima postiže se rotiranje vertikalnog dijagrama usmerenosti. Pored pomeranja dijagrama usmerenosti, algoritmom se delimično menja njegov oblik. Na oktavnim opsezima ispod 250 Hz nema usmeravanja jer je na tim učestanostima talasna dužina zvuka značajno veća od dimenzija korišćenog zvučnog niza. Usmerenost se javlja za učestanosti koje su porediva ili manje od dimenzija niza.

Na osnovu rezultata prikazanih na Slici 8 od a) do e) vidi se da se implementacijom algoritma za prostorno-vremensku obradu signala na procesoru *BSS* postiže usmeravanje maksimuma vertikalnog dijagrama usmerenosti u pravcu  $-30^\circ$ . Na taj način je verifikovano da je algoritam za kontrolu usmerenosti zvučnog niza uspešno implementiran na ovom procesoru. Za niže frekvencijske opsege, 250 Hz i 500 Hz, dijagram je širi jer je na tim opsezima dimenzija zvučnog niza srazmerna talasnoj dužini. Za više frekvencijske opsege uočava se sužavanje dijagrama usmerenosti, ali i pojava lokalnih maksimuma u dijagramu usmerenosti, pored postojanja jednog globalnog

maksimuma (glavnog loba). Lokalni maksimumi predstavljaju bočne lobove i oni su neželjena pojava. Ova pojava je posledica ponavljanja rastojanja između pojedinačnih zvučnika. Za frekvencijske opsege kod kojih je talasna dužina porediva sa ponovljenim rastojanjem pojava bočnih lobova je izražena. U ovom slučaju to je oktavni opseg sa centralnom frekvencijom 4000 Hz. Sa Slike 8 e) se može videti da je bočni lob samo 3 dB manji od glavnog loba. Problem bočnih lobova se može rešiti menjanjem geometrije zvučnog niza, ili primenom algoritama kojima se vrši potiskivanje bočnih lobova.

Na Slici 8 od f) do j) prikazani su vertikalni dijagrami usmerenosti kada je procesiranje signala izvršeno na *Bela* procesoru. Kao i za prethodno analizirani procesor dijagrami usmerenosti za sve prikazane oktavne opsege imaju maksimum u pravcu ugla  $-30^\circ$ . Na taj način je izvršena verifikacija uspešne implementacije algoritma za kontrolu dijagrama usmerenosti na procesoru *Bela*. Na oktavnim opsezima manjim od 250 Hz nema usmeravanja zbog dimenzija niza. Poredeći ove rezultate sa rezultatima dobijenim sa procesorom *BSS* uočava se nešto širi dijagram usmerenosti. Razlike koje se javljaju za pojedine uglove su reda dB, što može biti posledica greške prilikom merenja. Merenje je izvršeno pomoću rotacionog postolja koje se podešava ručno, pa je ponovljivost takvog postupka diskutabilna. Na Slici 8 j) uočava se prisustvo jakog bočnog loba, kao i u slučaju prikazanom pod e), što je posledica geometrije korišćenog zvučnog niza.

#### IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je implementacija algoritma za kontrolu usmerenosti zvučnog niza na dva tipa procesora. Jedan procesor predstavlja komercijalno dostupno rešenje koje se uobičajno koristi u multifunkcionalnim audio sistemima, dok je drugi procesor *open source* rešenje za obradu audio signala. Pokazano je da se na oba sistema uspešno može implementirati algoritam za prostorno-vremensku obradu signala. Merenjem u anehoičnim uslovima je potvrđeno da se dijagram usmerenosti zvučnog niza moguće kontrolisati primenom predloženog algoritma, sa oba procesora. Imajući u vidu cenu *Bela* procesora, koja je oko 10 puta manja od *BSS Blu 160* procesora, prikazane rezultate i dodatne mogućnosti koje je moguće implementirati na ovaj procesor zaključuje se da je *Bela* procesor dobar izbor za dalja istraživanja. U radu je pokazano da algoritam nema uticaj na horizontalni dijagram usmerenosti, jer se zvučnici nalaze u vertikalnoj ravni. Korišćeni zvučni niz, u vertikalnoj ravni, nije usmeren na oktavnim opsezima ispod 250 Hz zbog dimenzija samog niza, pa primena algoritma za obradu signala neće imati efekta. Za frekvencijske opsege iznad 250 Hz postoji usmerenost zvučnog niza, pa je moguće uočiti rezultate obrade signala koji se dovode na pojedinačne zvučnike. Za frekvencijske opsege na kojima je talasna dužina srazmerna rastojanju između zvučnika uočava se prisustvo lokalnih maksimuma u dijagramu usmerenosti-bočni lobovi. Bočni lobovi su posledica geometrije zvučnog niza i javljaju se kada se koriste oba procesora. Buduća istraživanja kretaću se u pravcu razvoja algoritama kojima bi se umanjio problem bočnih lobova. Taj problem može biti jako značajan u prostorima sa velikim vremenom reverberacije, gde bi značajan deo energije odlazio u deo prostora koji nije auditorijum.

#### ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan u okviru projekta TR 36026 koga finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Autori posebnu zahvalnost duguju Petru Jandriću za pomoć pruženu prilikom eksperimentalne verifikacije rada sistema.

#### LITERATURA

- [1] W.M. Hartmann, „Localization of sound in rooms”, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 74 (5), November 1983.
- [2] Miomir Mijić, Dragana Šumarac Pavlović, Miloš Bjelić, Miodrag Stanojević, Laboratorijski model zvučnog stuba sa softverski kontrolisanom usmerenošću, Tehničko rešenje, 2015.
- [3] S. Chuang, K. Yoshinobu, G. Woon-Seng, Generating dual beams from a single steerable parametric loudspeaker, Applied acoustics, No. 99, 2015, pp. 43-50.
- [4] Tehnička dokumentacija proizvođača, dostupno na mreži: <https://bssaudio.com/en/products/blu-160>, pristupano 28.7.2020.
- [5] Tehnička dokumentacija proizvođača, dostupno na mreži: <https://bela.io/>, pristupano 28.7.2020.
- [6] A. Mitra: On the Properties of Pseudo Noise Sequences with a Simple Proposal of Randomness Test, World Academy of Science, Engineering and Technology, International Scholarly and Scientific Research and Innovation, Vol. 2, No. 9, 2008, pp. 631 – 636.
- [7] Tehnička dokumentacija proizvođača, dostupno na mreži: <http://www.nti-audio.com/Portals/0/data/en/MiniSPL-Measurement-Microphone-Product-Data.pdf>, pristupano 28.7.2020.

#### ABSTRACT

Directional sound sources are a mandatory element in realization of many audio systems, whether it is an indoor or outdoor space which is being sound reinforced. This paper presents a directional sound source, the directivity of which can be controlled by software, instead of hardware, which is the case with most available solutions on the market. The sound system is comprised of 12 transducers and an audio processor with the same number of outputs, which allows for independent signal processing for each individual speaker. The paper presents the algorithm for space-time signal processing which allows beam-steering in the vertical plane. The algorithm is implemented on two different processors, and it was shown that both can be used for this purpose. The verification of the performance of the system was performed by measuring the directivity of the loudspeaker array in anechoic conditions. The paper also points out to the potential issues which can occur when utilizing this type of speakers and methods of overcoming them.

#### **The realization of a loudspeaker system with software-controlled directivity**

Miloš Bjelić, Aleksandar Golubović, Miomir Mijić