

## Konstrukcija uređaja za psivnu izvora zvuka u ravni TDOA metodom

---

*Konstruisan je autonomni uređaj za određivanje položaja izvora zvuka u horizontalnoj ravni u odnosu na sam uređaj. Upoređivani su primljeni signali od strane dva senzora zvuka metodom kroskorelacije. Određivanjem razlike u vremenu potrebnom da zvučni signal dospe od izvora do dva senzora zvuka utvrđen je traženi položaj. Analizirana je efikasnost uređaja pri različitim uslovima. Na racunaru su simulirani uslovi u posmatranom sistemu i analiziran algoritam.*

---

### Uvod

Lokalizacija izvora zvuka je proces određivanja položaja izvora zvuka u izabranom koordinatnom sistemu. U zavisnosti od pristupa, metode za lokalizaciju se dele na metode bliskih i dalekih polja. Kod metoda bliskih polja talasni front posmatranog talasa je sfernog oblika, dok je kod metoda dalekih polja talasni front ravan. Metoda dalekih polja podrazumeva da se izvor talasa nalazi na velikoj udaljenosti od prijemnika tako da se čestice koje osciluju u fazi nalaze u istoj ravni.

Na osnovu porekla posmatranog signala postoje pasivne i aktivne metode. Pasivne metode za lokalizaciju koriste samo signale emitovane od strane izvora, dok kod aktivnih uređaj emituje zvučni signal (Pertilä 2004).

Poslednjih godina, povećala se potreba za pasivnom lokalizacijom u nadzornim sistemima na aerodromima, lukama i industrijskim kompleksima. Lokalizacija zvuka može da se primeni u uslovima slabe vidljivosti, kao što su magla i mrak, a na video konferencijama na kojim učestvuje više od dva sagovornika, sistem za praćenje govornika ima veliku ulogu.

Lokalizacija zvuka je oblast koja je proteklih decenija istraživana u velikoj meri. Ipak, ne postoji opšte primenljivo rešenje. Najčešće korišćen metod, neretko u kombinaciji sa drugima, je TDOA (Time Difference Of Arrival). On podrazumeva određivanje razlike u vremenu potrebnom da zvučni signal dospe od izvora do dva senzora zvuka.

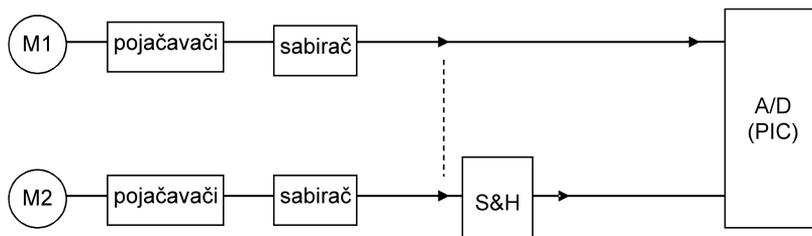
Cilj ovog rada je konstrukcija autonomnog uređaja za pasivnu lokalizaciju izvora zvuka dalekog polja metodom nalaženja TDOA.

---

*Ivan Razumenić  
(1989), Vršac, Trg  
Andre Lukića 4/1,  
učenik 3. razreda  
Gimnazije "Borislav  
Petrov-Braca" u Vršcu*

## Opis uređaja

Signal koji su mikrofoni registrovali, pojačava se i podešava upotrebom kola sa operacionim pojačavačima. Pojačani signali se konvertuju u digitalni oblik preko A/D konvertora integrisanog u mikrokontroleru (slika 1) i pamte u memoriji mikrokontrolera.



Slika 1.  
Blok shema uređaja

Figure 1.  
Device schematics

Kao senzori zvuka korišćeni su omnidirekcionni mikrofoni MCE100. Njihova prednost u odnosu na druge mikrofone je što su prijemne karakteristike jednake bez obzira na pravac zvučnog signala koji se registruje. Osetljivost mikrofona je 5.6 mV/Pa/1kHz, (SCHUKAT electronics) što pri registovanju govora odgovara naponu do 35 $\mu$ V ([www.sengpielaudio.com](http://www.sengpielaudio.com)).

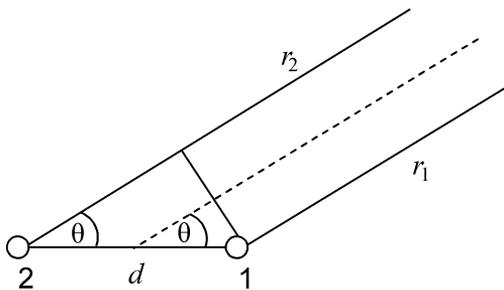
Pošto je opseg ulaznog napona A/D konvertora na mikrokontroleru 0–5V, signale sa mikrofona je trebalo pojačati. Zbog mogućnosti ponavljanja merenja pod istim uslovima kao zvučni signal korišćene su muzičke sekvence. Potrebno pojačanje za korišćen signal iznosilo je oko 100 puta. To je značilo postavljanje dva stepena pojačanja. Ukoliko je svrha sistema lokalizacija govornika, potrebno je samo prilagoditi pojačanje signala.

Nakon što je podešen intenzitet potrebno je podesiti ofset signala kako bi se negativne vrednosti napona našle u opsegu koji mikrokontroler registruje. Upotrebom sabirača, signalu je dodat napon od 2.5 V. Za kola pojačavača i sabirača upotrebljen je operacioni pojačavač TL082.

Mikrokontroler na kome su obrađivani sačuvani signali je pic16877a. On sadrži jedan A/D konvertor, pa nije moguća konverzija dva signala u isto vreme. Sample and Hold (S&H) kolo NE5537N ima ulogu da zadrži vrednost signala sa drugog mikrofona tokom konverzije prvog signala. Na taj način, signali sa mikrofona se naizmenično konvertuju i pamte u memoriju mikrokontrolera (slika 1). Maksimalna frekvencija odabiranja signala uslovljena je vremenom trajanja A/D konverzije na mikrokontroleru i iznosi 38.4  $\mu$ s. A/D konvertor je 10-bitni, pa svaka vrednost signala zauzima po 2 bajta memorije (PIC16F877A 2001). Zato je maksimalni broj odbiraka memorisanog signala 30.

## Metod

Dva senzora zvuka (mikrofona) postavljena su na maloj udaljenosti (5 cm) u odnosu na moguću udaljenost izvora zvuka. Pošto važi  $r_1, r_2 \gg d$  (slika 1), pravci prostiranja talasa prema jednom, odnosno drugom mikrofona su paralelni. Zvučnom talasu je potrebno različito vreme da pređe različita rastojanja od izvora zvuka do mikrofona 1 i 2 (slika 1), pa postoji fazna razlika između primljenih signala.



Slika 2.  
Prikaz situacije

Picture 2.  
Situation view

Sa slike 2 se vidi da važi relacija:

$$r_2 = r_1 + d \cos\theta,$$

gde su  $r_1$  i  $r_2$  rastojanja mikrofona od izvora zvuka,  $d$  – međusobno rastojanje mikrofona i  $\theta$  – ugao između izvora zvuka i prave koja prolazi kroz mikrofone. Ako se rastojanje napiše u obliku proizvoda brzine zvuka i vremena:

$$u t_2 = u t_1 + d \cos\theta,$$

dobija se zavisnost ugla  $\theta$  od razlike vremena potrebnih zvuku da dođe do mikrofona (TDOA):

$$\theta = \pm \arccos \frac{u \Delta t}{d}. \quad (1)$$

Metoda korišćena za upoređivanje signala, kako bi se odredila potrebna vrednost TDOA, je kroskorelacija:

$$\text{Corr}(g, h)_i = \sum_{j=1}^n g_j h_{j+i}.$$

Kod kroskorelacije se upoređuju dva slična signala (niza brojnih vrednosti)  $g$  i  $h$  od kojih jedan kasni u odnosu na drugi. Nizovi imaju po  $n$

članova. Algoritam se sastoji u tome što se jedan niz pomeri u odnosu na drugi za  $i$  članova, gde je  $-n < i < n$ , i pomnože se naspramni članovi nizova. Sabiranjem dobijenih proizvoda dobija se vrednost kroskorelacije za pomeraj  $i$ . Traženi pomeraj  $N$  odgovara najvećoj dobijenoj vrednosti. Vremensko kašnjenje (TDOA) je:

$$\Delta t = \frac{N}{f_0}$$

gde je  $f_0$  – frekvencija odabiranja signala.

Iz (1) se dobija:

$$\theta = \pm \arccos \frac{u N}{d f_0}. \quad (2)$$

Nakon što je urađena kroskorelacija, da bi se odredio ugao  $\theta$  treba izračunati arccos dobijene vrednosti. Pošto korišćen mikrokontroler nema množače, sve operacije na njemu mogu da se obave samo sabiranjem. Zato je upotrebljen CORDIC (COordinate Rotation DIgital Computer). To je jednostavan i efikasan algoritam za računanje trigonometrijskih i logaritamskih funkcija sabiranjem i šiftovanjem (Torkowski 1990).

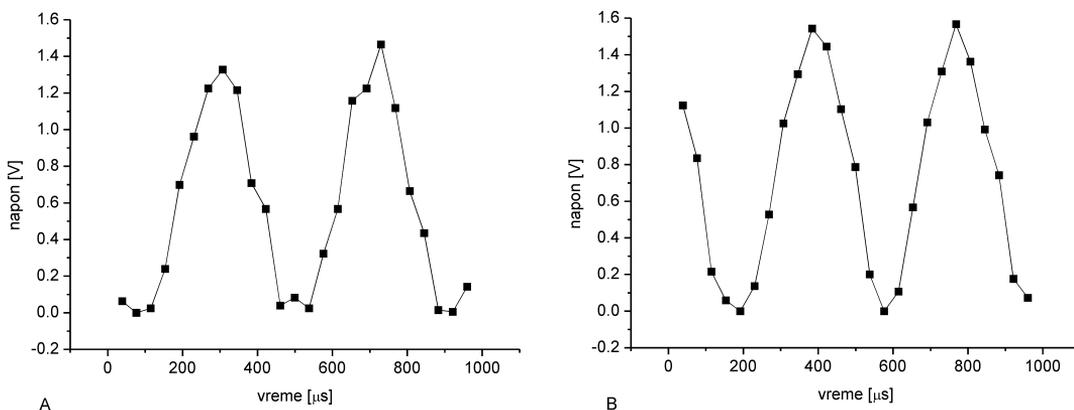
## Rezultati

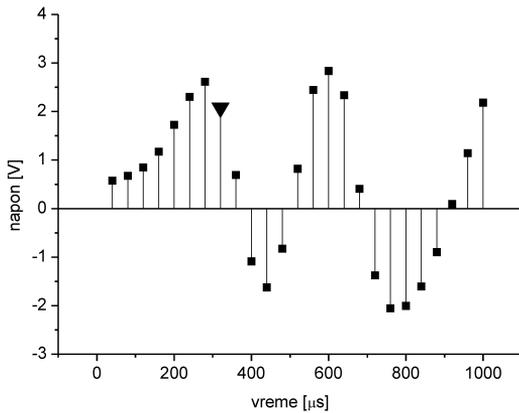
Izvor zvuka je postavljen na utvrđeno mesto u odnosu na uređaj, ali pri istim uslovima su dobijane različite vrednosti za ugao  $\theta$ . Među ovim vrednostima nije ustanovljena težnja ka određenom rezultatu. Zato je, kako bi se utvrdio razlog netačnosti, uređaj testiran iz dva dela.

Deo uređaja za prilagođavanje analognog signala i konverziju u digitalni oblik testiran je na sledeći način: Izvor zvuka emitovao je signal sinusoidalnog oblika poznate frekvencije 3 kHz; nakon konverzije, signal je sačuvan u memoriji mikrokontrolera. Na slici 3 prikazani su signali koje su registrovali mikrofoni 1 i 2:

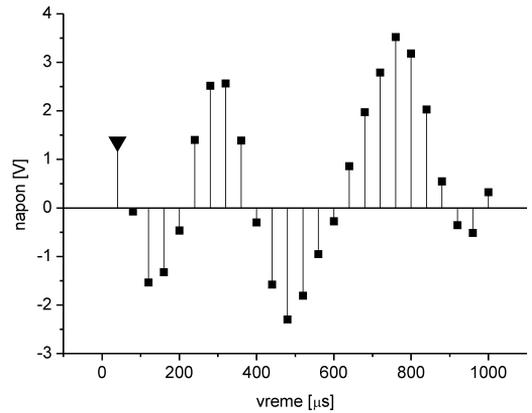
Slika 3.  
Signali registrovani  
mikrofonom jedan (A)  
i mikrofonom 2 (B) .

Figure 3.  
Signal registrated by  
microphone 1 (A) .and  
microphone 2 (B)





A



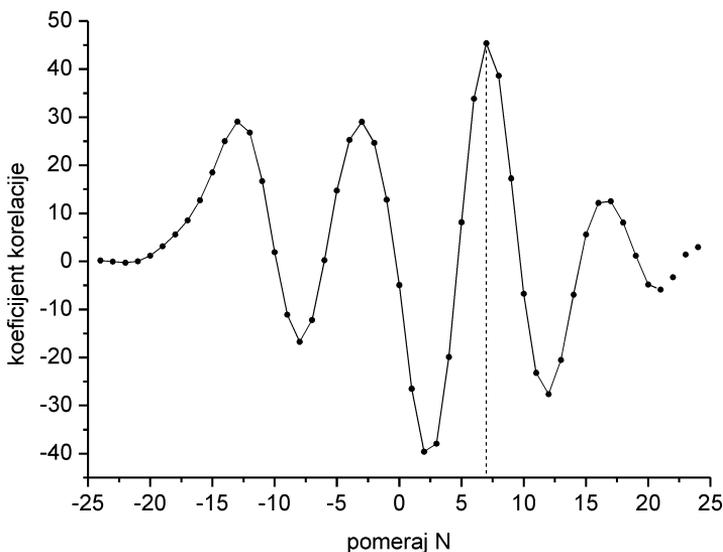
B

Sa slike 3 se vidi da su signali memorisani u mikrokontroleru verodostojno predstavljali originalni zvučni talas. Bili su sinusoidalnog oblika frekvencije oko 3 kHz.

Da bi se proverio algoritam za poređenje signala i izračunavanje ugla  $\theta$ , na računaru su simulirani uslovi pod kojima se nalaze signali tokom procesa lokalizacije. Generisana su dva identična signala frekvencijskog spektra 50–4000 Hz. Pošto se mikrofoni nalaze na različitoj udaljenosti od izvora zvuka, pored fазne razlike primljenih signala, razlikuje se njihov intenzitet. Signali se međusobno razlikuju i zbog eha, drugih zvučnih signala i šuma. Zato su generisani signali modifikovani u skladu sa tim razlikama. Zatim su signali odabirani frekvencijom 25 kHz i dobijena su dva signala A i B (slika 4).

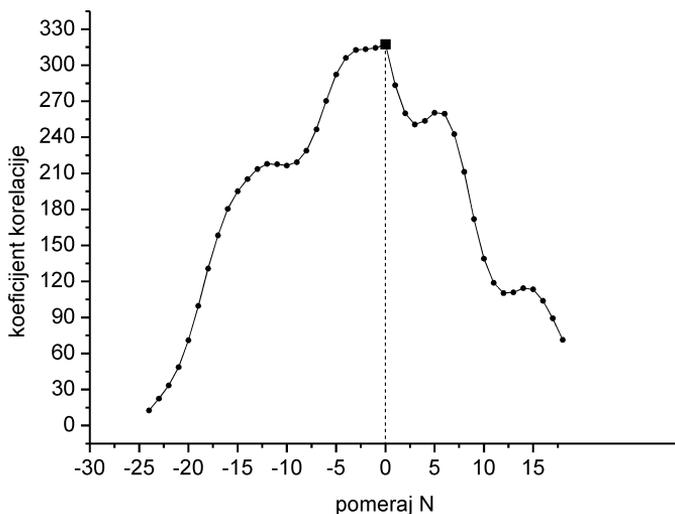
Slika 4. Simulirani signali A (levo) i B (desno)

Figure 4. Simulated signals A (left) and B (right)



Slika 5. Kroskorelacioni koeficijenti signala A i B

Figure 5. Cross-correlation coefficients of signals A and B



Slika 6.  
Kroskorelacioni  
koeficijenti signala A  
i B nakon  
podešavanja ofseta

Figure 6.  
Cross-correlation  
coefficients of signals  
A and B after  
offsetting

Postupak je više puta ponavljan sa različitim uslovima i nakon poredjenja signala *A* i *B* rezultat kroskorelacije je u 85% slučajeva bio tačan. Zašto onda i u stvarnosti nisu dobijani većinom tačni rezultati? Na ulaz mikrokontrolera može da se dovede napon 0–5 V, pa je signalu sa mikrofona, nakon pojačanja, podešen ofset. Kada se to uradi i u simulaciji, rezultat kroskorelacije je tačan u samo 25-30% slučajeva u zavisnosti od početne fazne razlike. Naime, koeficijent korelacije, prema (1), najveći je kada se poklope pozitivne vrednosti jednog sa pozitivnim vrednostima drugog signala, a negativne vrednosti sa negativnima (slika 5). Pošto su nakon ofsetovanja sve vrednosti signala pozitivne, a usled malog broja odboraka (30), najveći koeficijent korelacije je uvek bio za pomeraj blizak nuli (slika 6).

## Diskusija

Da bi proces lokalizacije bio uspešan, između dve konverzije potrebno je napraviti pauzu od najmanje 1.6  $\mu$ s (PIC16F877A 2001). To je učinjeno upotrebom funkcije `Delay_us()`. Ova funkcija nema konstantnu vrednost, pa frekvencija odabiranja signala nije bila jasno definisana. Verodostojnost memorisanog signala bi bila povećana preciznim definisanjem frekvencije odabiranja. To se može postići brojanjem određenog broja taktova tajmera.

Svrha S&H kola je bila da se omogućí odabiranje oba signala u istim vremenskim trenucima korišćenjem samo jednog A/D konvertora, ali to nije bilo neophodno. Naime, odabiranje signala bi se vršilo naizmenično, sa kašnjenjem za utvrđeni vremenski interval  $\tau$ . Poznavanjem vrednosti  $\tau$  može da se odredi TDOA, potreban za izračunavanje ugla  $\theta$ .

Signal koji je zadržan na S&H kolu imao je stalnu vrednost tokom A/D konverzije, te zbog toga ima veću sličnost sa oblikom sinusoide od onog koji nije zadržan na S&H kolu (slika 3). Kako bi se povećala preciznost merenja S&H kolo može da se postavi i pre konverzije signala prvog mikrofona (slika 1).

Na osnovu (2), postoje dve vrednosti ugla kao moguća rešenja. Ova pojava se naziva aliasing i posledica je korišćene metode nalaženja TDOA. Dodavanjem još dva mikrofona uređaju, može se izvršiti lokalizacija izvora zvuka u 3D prostoru bez mogućih duplikata položaja.

Na onovu rezultata simulacije uočeno je da je nakon konverzije signala potrebno da se podesi ofset tako da odbirci budu ranomerno raspoređeni iznad i ispod nule, i tek tada može da se uradi kroskorelacija.

Tačnost uređaja može da se poveća povećavanjem broja odbiraka sačuvanih signala. To može da se postigne ako bi vrednost svakog odbiraka zauzimala po jedan bajt u memoriji mikrokontrolera, a ne dva. Opseg konvertovanog signala nalazio bi se u intervalu od 0–255 i ne bi se pamtile “najznačajnije cifre” čija bi vrednost bila 0.

## Zaključak

Konstrukcija autonomnog uređaja za lokalizaciju izvora zvuka dalekog polja je moguća metodom nalaženja TDOA. Upotreba S&H kola je značajna pri konvertovanju analognog u digitalni signal, ali nije potrebno da se koristi za pamćenje signala usled postojanja jednog A/D konvertora. Frekvenciju odabiranja treba precizno podesiti korišćenjem tajmera. Pre kroskorelacije signala treba podesiti signale tako da su vrednosti odbiraka ravnomerno raspoređene iznad i ispod nule. Dodavanjem jednog, odnosno dva mikrofona uređaju može da se lokalizuje izvor zvuka u dve, odnosno tri dimenzije.

**Zahvalnost.** Zahvaljujem se saradnicima seminara primenjene fizike i elektronike na sugestijama i pomoći tokom istraživanja: Darku Todoroviću, Filipu Panjeviću, Miodragu Đukiću, Srđanu Jovanoviću, Mariji Janković, Dajani Danilović, kao i saradniku seminara fizike Igoru Stamenovu.

---

## Literatura

Pertilä P. 2004. *A spatiotemporal approach to passive sound source localization*. Tampere University of technology, Finland

PIC16F877A 2001. Data Sheet. 2001 Microchip Technology Inc.

SCHUKAT electronics. <http://www3.schukat.com>

Torkowski K. 1990. *Fixed-point trigonometry with CORDIC iterations.*  
Apple Computer  
<http://www.sengpielaudio.com/TableOfSoundPressureLevels.htm>

---

*Ivan Razumenić*

## Device Construction for Passive Sound Source Localization in a Plain Using TDOA Method

The goal of sound source localization is to determine sound source position in a chosen coordinate system. It has been assumed that sound source was far from sound receivers. Signals received by two microphones were compared using cross-correlation method and time difference of arrival (TDOA) for two signals was measured. Azimuth angle of sound source was calculated using TDOA method. Autonomous device with microcontroller has been constructed. Signals from microphones have been adjusted for microcontroller using a set of operational amplifiers and sample & hold circuit. Efficacy of device was analyzed in different conditions. Simulation of physical conditions was made on a computer and algorithm for azimuth angle determination was analyzed too. By adding one or two microphones to the system, sound source localization can be expanded to two or three dimensions..

