

3D lokalizacija izvora zvuka merenjem kašnjenja prijemnih signala

U radu je analiziran problem lokalizacije izvora zvuka u trodimenzionalnom prostoru. Određivanje pozicije izvora vršeno je metodom koja se bazira na razlikama u vremenu pristizanja zvučnog signala (TDOA). Za akviziciju signala korišćena su četiri mikrofona i integrisano razvojno okruženje STM32F4i_DISCO. Kroskorelacijom su izračunata kašnjenja signala, na osnovu čega je procenjen položaj izvora zvuka korišćenjem optimizacionih metoda gradient descent i Nelder–Mead. Izmerena pouzdanost ovih metoda je 33 mm i 37 mm, respektivno. Preciznosti metoda su jednake, sa standardnom devijacijom 13 mm. Zaključeno je da refleksija zvučnog signala značajno utiče na kroskorelaciju. Izborom pogodnog test-signala ovaj uticaj je potisnut na manje od 10% slučajeva.

Uvod

Sistem za lokalizaciju izvora zvuka može se primeniti u lokalizaciji objekata, na primer govornika, robota, vozila i slično, koji na sebi ne moraju da nose poseban uređaj. Jedini uslov da lokalizacija bude moguća jeste da se u prostoru u kome je postavljen sistem za akviziciju (set mikrofona) nalazi objekat koji proizvodi zvuk. Kako na prijemnike različite udaljenosti zvuk stiže za različito vreme, na osnovu vremenskih razlika može se odrediti pozicija izvora tog zvuka.

Najčešće metode za lokalizaciju izvora zvuka su Time of arrival – TOA (vreme pristizanja signala), Time difference of arrival – TDOA (razlika u vremenu pristizanja signala), Angle of arrival – AOA (ugao pristizanja) (Ahlberg 2014). TOA metod procenjuje poziciju izvora na osnovu informacija o početku emitovanja signala i vremenu pristizanja signala na prijemnike. Kod ove metode najmanji broj prijemnika u n -dimenzionalnom prostoru iznosi n . Povećanje broja prijemnika povećava sigurnost u procenjenju poziciju i smanjuje uticaj šuma. Pomoću TDOA metode, za razliku od TOA, pozicija izvora se procenjuje samo na osnovu informacija o vremenu pristizanja generisanog zvučnog signala na prijemnike. Prednost ove metode je u tome što ne zahteva komunikaciju sa izvorom. Kod ove metode u n -dimenzionom prostoru najmanji broj prijemnika je $n + 1$. AOA

*Andrea Ćirić (1997),
Kraljevo, Hajduk
Veljkova 16/6,
učenica 3. razreda
Gimnazije Kraljevo*

*Marko Skakun (1997),
Sremska Mitrovica,
Laćarak, 1. novembra
350, učenik 3. razreda
Mitrovačke gimnazije*

MENTORI:

*Marija Janković,
doktorand na
Elektrotehničkom
fakultetu Univerziteta
u Beogradu*

*Vuk Vukomanović,
student
Elektrotehničkog
fakulteta Univerziteta
u Beogradu*

procenjuje ugao pod kojim se nalazi izvor u odnosu na prijemnike. Ovaj metod može vršiti procenu signala na osnovu podataka o kašnjenju signala i na osnovu razlike intenziteta pristiglih signala.

Zbog mogućnosti da nije potrebno imati informacije o početku slanja signala sa izvora metod koji se koristi u radu je TDOA. Ova karakteristika je bitna jer ne zahteva komunikaciju predajnika i sistema, samim tim predajnik može biti bilo koji zvučni izvor.

Kod TDOA metode, razlika u vremenu pristizanja signala na mikrofone u realnom sistemu može se odrediti na više načina: threshold metodom, kroskorelacijom, hardverski, itd. U našem radu razlika vremena u pristizanju određuje se metodom kroskorelacije. Razlika vremena pristizanja signala se zatim određuje i za pretpostavljenu poziciju izvora zvuka, koja se u prvoj iteraciji bira nasumično. Poređenjem vremenskih razlika u pristizanju signala između realnog sistema i pretpostavljenog položaja izvora računa se funkcija odstupanja. Poziciju izvora zvuka u realnom prostoru predstavlja pozicija minimuma funkcije odstupanja, koji se procenjuje primenom optimizacionih metoda.

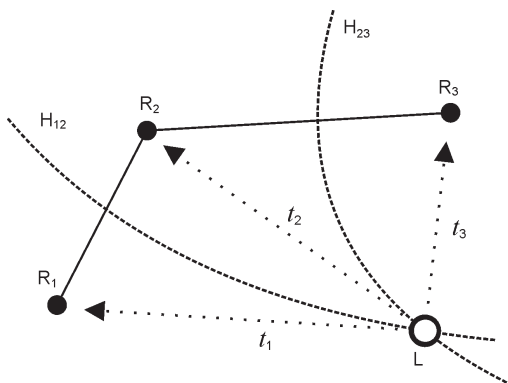
U našem radu porede se pouzdanost (tačnost) i preciznost (standardna devijacija) lokalizacije korišćenjem gradient descent i Nelder–Mead optimizacionih metoda.

Metoda

Metoda za lokalizaciju korišćena u našem radu bazira se na TDOA. Izračunavanje vremenske razlike u pristizanju signala između referentnih tačaka (parova mikrofona) vrši se pomoću kroskorelacije. Potom se pomoću optimizacionih metoda određuje minimum funkcije odstupanja procenjene lokacije. Pozicija minimuma predstavlja procenjenju lokaciju izvora zvuka. Blok šema metode prikazana je na slici 2.

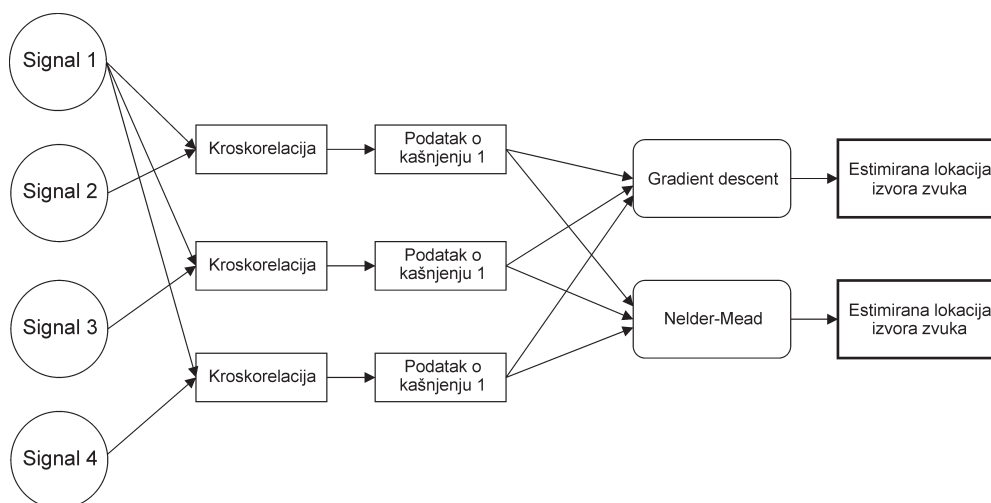
Time Difference of Arrival (TDOA)

Osnovu metode predstavlja činjenica da vreme putovanja zvuka zavisi od udaljenosti izvora i prijemnika. Na osnovu vremenskih razlika u pri-



Slika 1. Princip TDOA metoda

Figure 1. TDOA method



Slika 2. Blok šema TDOA metode

Figure 2. TDOA method block diagram

stizanju zvuka na različite prijemnike može se odrediti pozicija izvora tog zvuka (Gustafsson i Gunnarsson 2003).

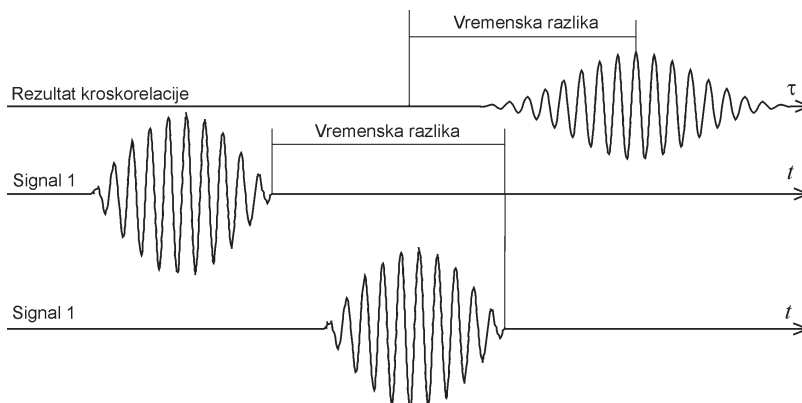
Na slici 1 prikazan je princip TDOA metode u slučaju tri mikrofona (R1, R2 i R3) i izvorom zvuka (L). Na osnovu jednog podatka o vremenskom kašnjenju signala $\Delta t_{12} = t_2 - t_1$ između dva mikrofona R₁ i R₂ dobija se hiperbola H₁₂, koja predstavlja moguće pozicije izvora zvuka. Isto važi i za mikrofone R₂ i R₃, gde se dobija hiperbola H₂₃. Presek dve dobijene hiperbole određuje poziciju izvora zvuka u 2D prostoru. Kada je u pitanju 3D prostor, potrebna su najmanje 4 mikrofona (tri kašnjenja) i hiperbole zamenjuju hiperboloidi, čija tačka preseka predstavlja poziciju izvora zvuka.

Kroskorelacija

Kroskorelacija je mera sličnosti dva signala. Koristi se za utvrđivanje vremenske razlike, tj. vremena kašnjenja između signala. Funkcioniše tako što se jedan signal pomera duž vremenske ose u odnosu na drugi i u pozitivnom i u negativnom smeru i za svaki jedinični pomeraj računa se suma proizvoda ta dva signala (1). Signali se dopunjavaju nulama u vremenskim opsezima u kojima njihova vrednost nije definisana kako bi se izvršilo pravilno množenje.

$$(f * g)[\tau] = \sum_{-\infty}^{+\infty} f[\tau] g[t + \tau] \quad (1)$$

Kao krajnji rezultat dobija se nov niz (odnosno funkcija). Mesto maksimuma tog niza predstavlja najveće podudaranje signala (slika 3). U slučaju određivanja kašnjenja dva signala, taj maksimum pokazuje trenutak



Slika 3.
Princip
kroskorelacije

Figure 3.
Cross-correlation
example

u vremenu kada su data dva signala najsljednija, tj. kašnjenje između ta dva signala τ_{delay} (2). Zbog mogućnosti da dopunjavanje signala nulama unese grešku korišćena je normalizovana kroskorelacija, koja normalizuje dobijeni niz prema odnosu broja odabiraka korisnog signala i dodatih nula.

$$\tau_{\text{delay}} = \arg \max_{\tau} (f * g)[\tau] \quad (2)$$

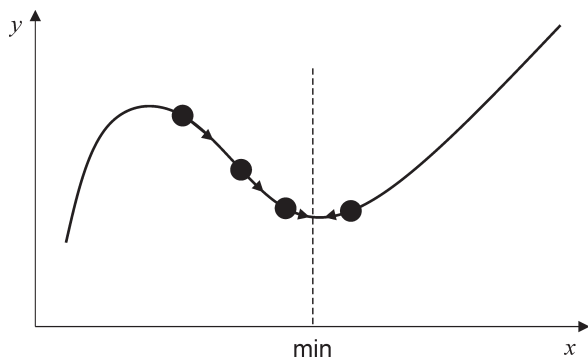
Metode optimizacije funkcije odstupanja greške

Optimizacija predstavlja traženje lokalnih maksimuma ili minimuma funkcija sistematičnim biranjem vrednosti promenljivih iz određenog skupa. U ovom radu koriste se dve metode za optimizaciju: gradient descent i Nelder–Mead. Posmatra se sistem prijemnika ($x_i, y_i, z_i, i = 0, 1, 2, 3$). Na osnovu kašnjenja signala između i -tog i nultog mikrofona može se odrediti pozicija izvora zvuka (x, y, z) nalaženjem minimuma funkcije

$$f_g = \sum_{i=1}^3 \left(\sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2} - \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} - \Delta t_i \cdot c \right)$$

gde je c brzina zvuka, Δt_i kašnjenje između signala dobijenih sa i -tog i nultog mikrofona i f_g funkcija greške. Vrednost funkcije zavisi od položaja mikrofona i podataka o kašnjenju. Funkcija greške ima samo jedan minimum koji je jednak nuli kada se x, y, z funkcije greške poklope sa x, y, z koordinatama izvora, što je čini pogodnom za primenu optimizacione metode.

Gradient descent. Gradient descent (Web 5) je optimizaciona metoda kojom se pronalazi lokalni minimum zadate funkcije. Početni položaj bira se nasumično i nalazi se u domenu zadate funkcije. Tačka se pomera u smeru opadanja gradijenta funkcije za određeni korak. Nakon svakog pomeraja tačka je sve bliža minimumu dok naposljetku ne počne da osciluje oko minimuma (slika 4). Odluka o kraju sekvence, tj. prihvatanju trenutne pozicije može biti doneta na osnovu ukupnog broja iteracija, promene



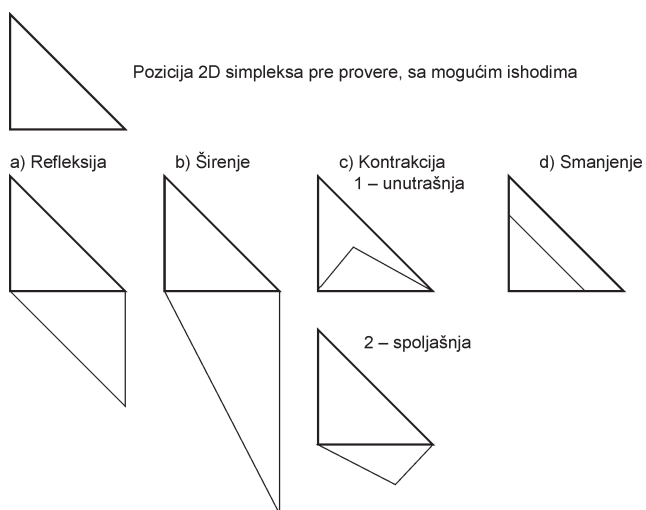
Slika 4. Princip rada gradient descent optimizacionog metoda

Figure 4. Gradient descent optimisation method

vrednosti funkcije između dve uzastopne pozicije ili nekom drugom metodom.

Implementirana je metoda koja umesto računanja gradijenta, procenju tačku pomera u susednu tačku sa najmanjom vrednošću funkcije greške. Metoda radi na virtuelnom diskretizovanom prostoru gluve sobe sa najmanjim pomerajem 0.5 cm. Sekvenca se ponavlja dok procenjena tačka ne počne da osciluje, pod pretpostavkom da može da osciluje samo oko minimuma. Najveći problem ovakvog pristupa je mali korak, usled čega pri velikoj rezoluciji diskretizovanog prostora, a maloj rezoluciji merenja, može doći do oscilovanja procenjene tačke oko tačke koja nije minimum, što daje pogrešan rezultat. Do ove pojave dolazi kada se, usled male rezolucije merenja, zaredom pojave tri tačke sa istom vrednošću funkcije greške.

Nelder–Mead. Nelder–Mead (Web 6) je heuristička optimizaciona metoda, koja ne zahteva određivanje gradijenta, niti izvoda funkcije greške, već koristi simpleks, strukturu koja se sastoji od $n + 1$ tačaka u n -dimenzionalom prostoru. Prvo se zadaje početni položaj simpleksa, koji može biti nasumičan. Nakon pozicioniranja simpleksa određuje se vrednost funkcije greške u svim tačkama simpleksa i pomera se ona tačka koja ima



Slika 5. Optimizacioni metod Nelder–Mead

Figure 5. Nelder–Mead optimisation method: a – reflection b – expansion c1 – inside contraction c2 – outside contraction d – shrinkage

najveću grešku. Načini pomeranja simpleksa mogu biti: refleksija, proširenje, kontrakcija i smanjenje (slika 5).

Pošto je ovo opisna metoda, ona se zasniva na setu uslova koji se proveravaju određenim redosledom. Tako da, ako se ispune uslovi za refleksiju, vrši se refleksija, zatim ponovo počinje određivanje greške za sve tačke, a u slučaju da se ne ispune uslovi za refleksiju, proveravaju se uslovi za proširenje, pa ako ni oni nisu ispunjeni, vrši se provera uslovi za kontrakciju. Ukoliko nijedan set uslova nije ispunjen vrši se skupljanje.

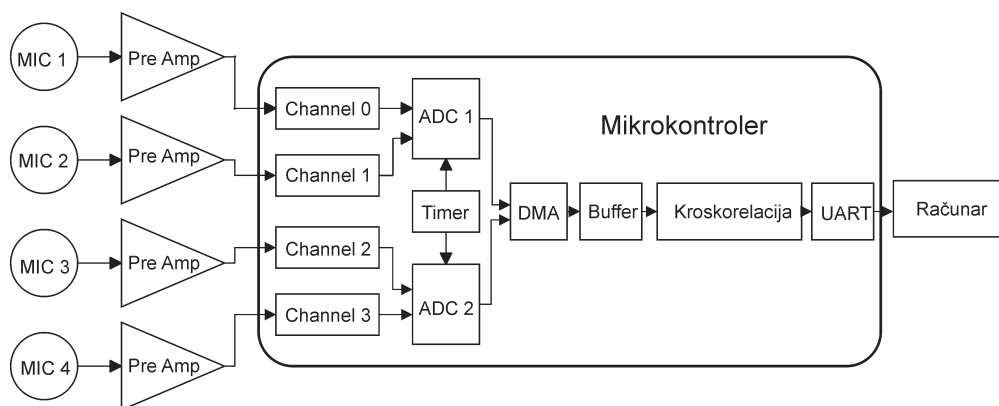
Odluka o pronađenom minimumu donošena je samo na osnovu broja iteracija. Broj iteracija koji je unet za maksimum je 100. Odabrani početni položaj simpleksa je u sredini sobe, centralno simetričan mikrofonima, jer tada lako može da se pomeri u bilo koju tačku prostora gluve sobe.

Aparatura

Aparatura se sastoji od četiri mikrofona sa prepojačavačima, mikrokontrolera i računara (slika 6). Mikrofon pretvaraju zvučni signal u električni. Prepojačavači obezbeđuju da se koristan signal nađe u punom opsegu analogno-digitalnog konvertora (ADC), kako bi se obezbedila što bolja rezolucija merenog signala. Mikrokontroler snima električni signal, nad signalom vrši kroskorelaciju i podatke o kašnjenju šalje na računar. Računar vrši procenu lokacije izvora zvuka na osnovu podataka o kašnjenju.

Za izvor zvuka odabran je zvučnik marke Neo, koji je deo 2.1 sistema, zbog velike snage i relativno malih dimenzija. Važno je da dimenzije zvučnika budu što manje pošto one direktno utiču na maksimalnu pouzdanost sistema.

Mikrofon koji su korišćeni su PMOF-9767NW-46UQ (Web 1) jer su omnidirekcionni (primaju zvuk podjednako iz svih smerova) i malih su



Slika 6. Blok šema aparature

Figure 6. Apparatus block diagram

dimenzija. Male dimenzije mikrofona su bitne zbog tačnijeg određivanja pozicije mikrofona.

Korišćeni pretpojačavači su RK 3351 (Web 2) propusnog opsega 20 Hz–18 kHz, sa mogućnošću podešavanja pojačanja 150–1500 puta. Menjanjem pojačanja pretpojačavača se kalibriše aparatura, tako da snimani signal bude u punom opsegu ADC-a.

Korišćeno je integrisano razvojno okruženje STM32F4i_DISCO (Web 3) sa STM32F429ZI mikrokontrolerom. Ovo razvojno okruženje je odabrano zbog karakteristika procesora, memorije i periferija, koje su bile potrebne da bi se vršila akvizicija podataka i obrada signala kroskorelacijom. Jedna od važnih karakteristika ovog okruženja je brzina ADC-a, pošto ona direktno utiče na maksimalnu rezoluciju određivanja pozicije izvora zvuka. Mikrokontroler sadrži tri ADC-a maksimalne brzine odabiranja 2.4 MSps i 24 kanala (Web 3). U našem radu korišćena su po dva kanala na dva ADC-a, jer tada oba konvertora snimaju paralelno (u isto vreme). Na taj način postiže se dva puta veća brzina odabiranja (4.8 MSps), nego kada se koriste četiri kanala jednog ADC-a. Početak merenja ADC-a reguliše tajmer, čime je omogućena precizna promena brzine odabiranja ADC-a. Izmerene vrednosti se pomoću DMA (direct memory access) prenose iz ADC registra u bafer koji je smešten u RAM memoriji. Mikrokontroler vrši kroskorelaciju nad signalom i podatke o kašnjenju šalje preko UART (universal asynchronous receiver/transmitter) protokola na računar (slika 6). Kako računar ne može direktno da očitava UART protokol, korišćen je USB UART board koji sadrži FT232RL integrisano kolo, koje je interfejs USB-a u UART protokol (Web 4).

U cilju smanjenja šuma izazvanog kablom koji spaja mikrofone i pojačavače, mikrofoni su postavljeni direktno na pojačavače, a zatim su izlazi sa pojačanim signalom sprovedeni do ulaza AD konvertora mikrokontrolera.

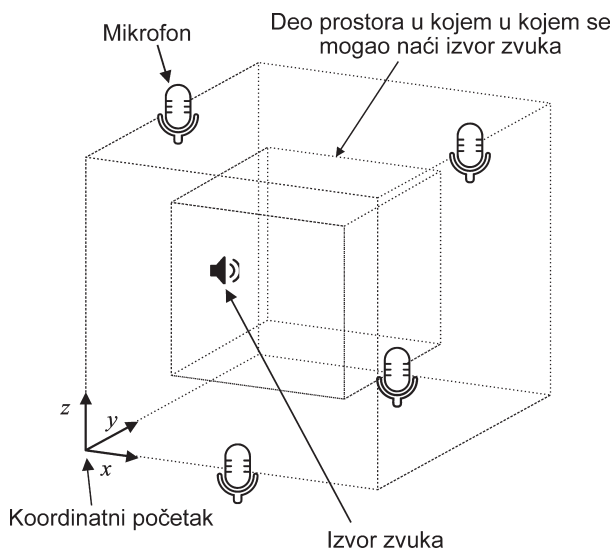
Rezultati i diskusija

Realizovan sistem je testiran. Merenje se sastojalo od emitovanja posebno dizajniranog test signala sa izvora zvuka koji je pomeran u prostoru. Zatim je na osnovu snimljenih signala pristiglih na svaki od mikrofona procenjena pozicija izvora zvuka metodama gradient descent i Nelder–Mead. Greška za obe metode određena je kao razlika između prave i procenjene pozicije izvora zvuka. Merenja su vršena u delu prostora gluve sobe dimenzija 1×1×1 m sa mikrofonima pozicioniranim kao na slici 8.

Početak referentnog sistema je vezan za jedno teme imaginarne kocke. Izvor zvuka je pomeran sa korakom od 10 cm od koordinata (20, 20, 20) do koordinata (80, 80, 80), u pravcima paralelnim sa x , y i z osom. Na taj način dobijena je matrica od 7×7×7 merenja dimenzija 60×60×60 cm (slika 7).

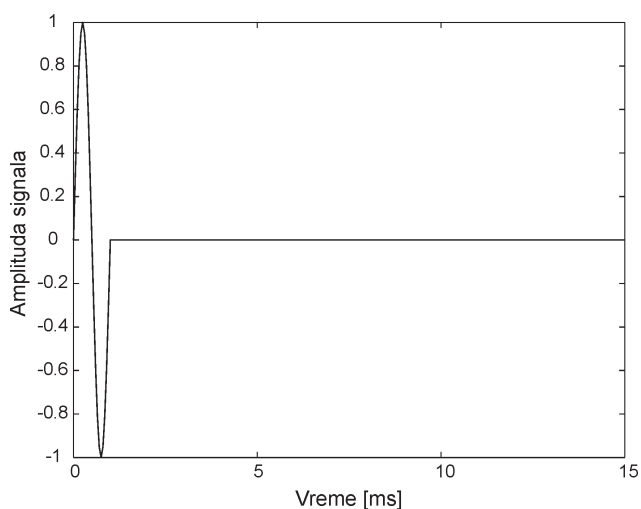
Izvršeno je 1029 merenja u 343 tačke (u svakoj merenoj tački izvršena su 3 ponavljanja). Na osnovu izvršenih merenja određene su greške kroskorelacije.

Korišćeni test-signal se sastoji od periodičnog ponavljanja sekvence koja sadrži jednu periodu sinusoidalnog signala učestanosti 1 kHz i pauzu



Slika 7.
Pozicije mikrofona i dela prostora u kojem su vršena merenja u odnosu na prostoriju

Figure 7.
Position of microphones and the part of the space in which the measurements were done



Slika 8.
Korišćeni test signal, odsečen na 15 ms

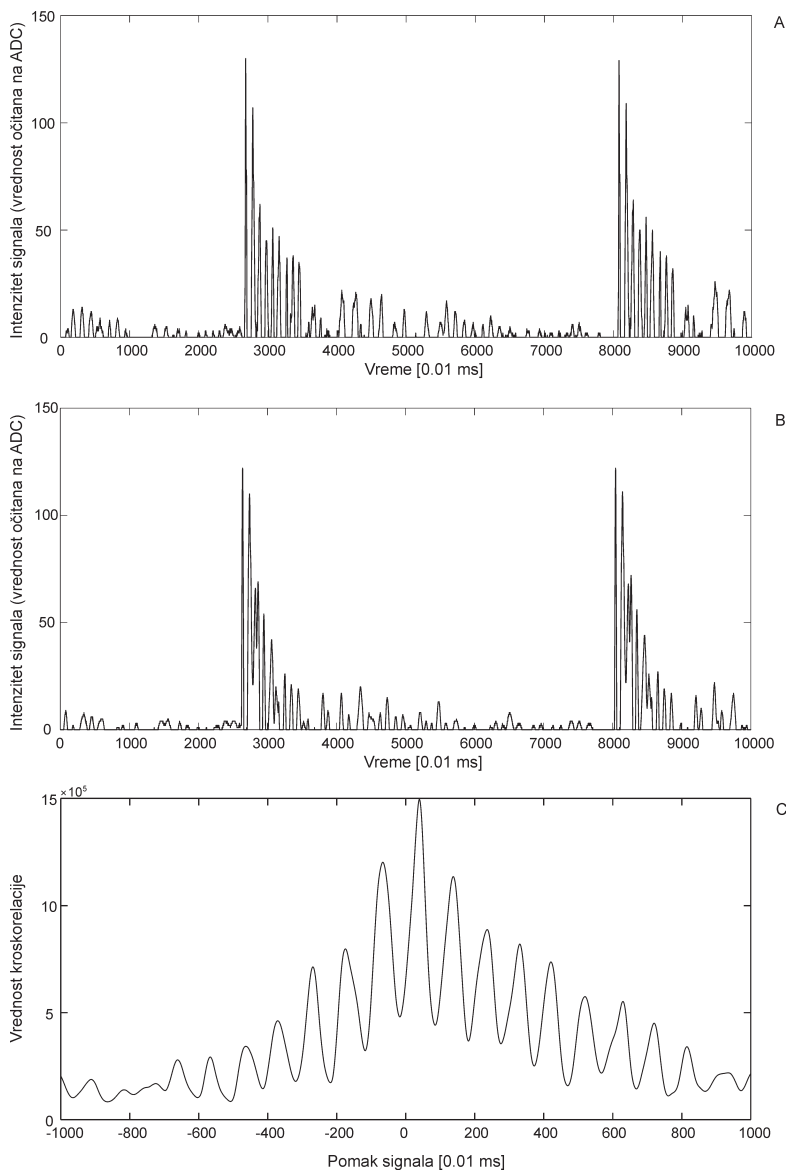
Figure 8.
Test signal, trimmed to 15 ms

dužine 50 ms. Na slici 8 prikazano je prvih 15 ms signala. Koristan signal se sabere sa reflektovanim signalom i zbog interferencije se izgubi među reflektovanim signalima, što period tišine u emitovanom signalu rešava.

Na slici 9 prikazan je primer prijernih signala jednog para mikrofona kada ne dolazi do pojave interferencije, a na slici 10 primer gde je došlo do znatnije interferencije.

Kod prijernih signala gde nije došlo do pojave interferencije jasno se vidi da je glavni pik najizraženiji, dok su ostali pikovi manji i predstavljaju refleksije (slika 9 A i B).

Na slici 10A pik 1 je koristan (direktno primljen) signal, dok pik 2, koji predstavlja refleksiju, ima veću vrednost, jer je došlo do interferencije više reflektovanih signala u fazi.

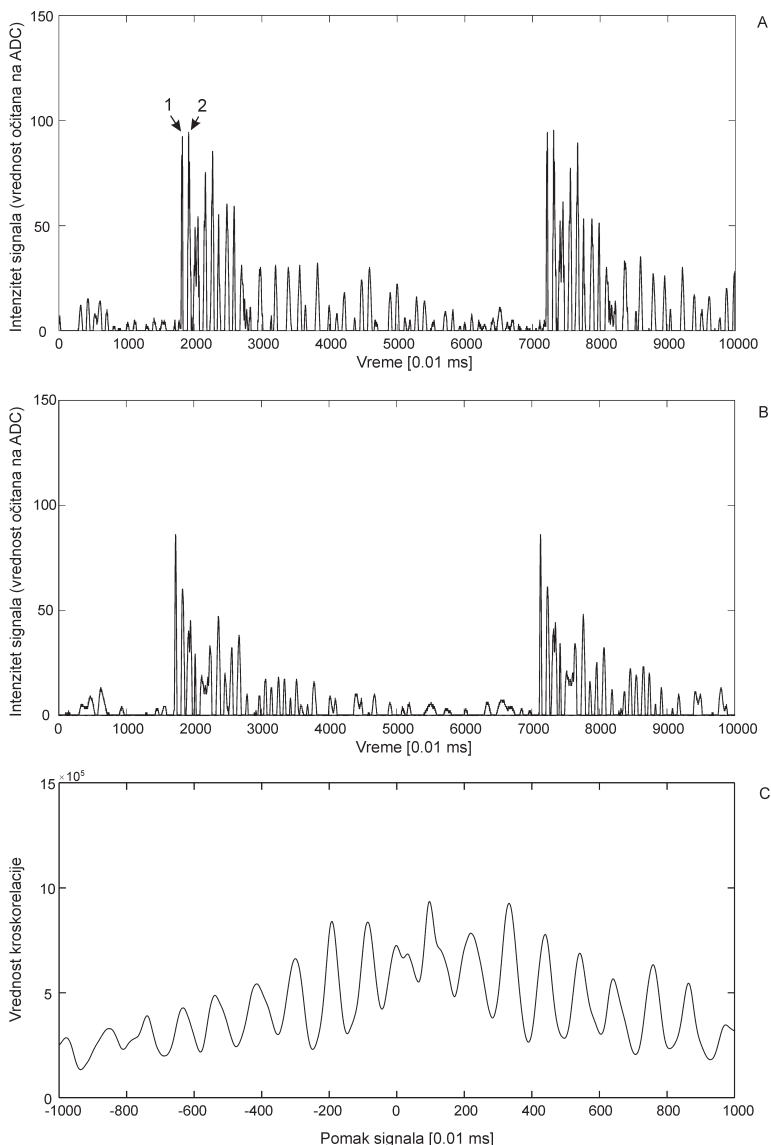


Slika 9.
 Ulazni signali kada ne dolazi do znatne pojave interferencije:
 A – signal sa prvog mikrofona
 B – signal sa drugog mikrofona
 C – kroskorelacija signala A i B

Figure 9.
 Input signal example without significant interference:
 A – signal from the first microphone
 B – signal from the second microphone
 C – cross-correlation of signals A and B

Na slikama 9C i 10C prikazana je vrednost kroskorelacije za prijemne signale u slučaju bez izražene interferencije, odnosno sa pojavom interferencije. Na slici 9C se jasno uočava pik najveće vrednosti koji određuje najveću sličnost dva signala, tj. vreme kašnjenja. Nasuprot tome, na slici 10C, usled interferencije pik najveće vrednosti nije izražen, što unosi grešku pri računanju kašnjenja.

Greška predstavlja odstupanje izmerene vrednosti kašnjenja od očekivane vrednosti, izražena u ms. Na slici 11 prikazan je procenat merenja čija je greška kroskorelacije manja od definisane granične greške.



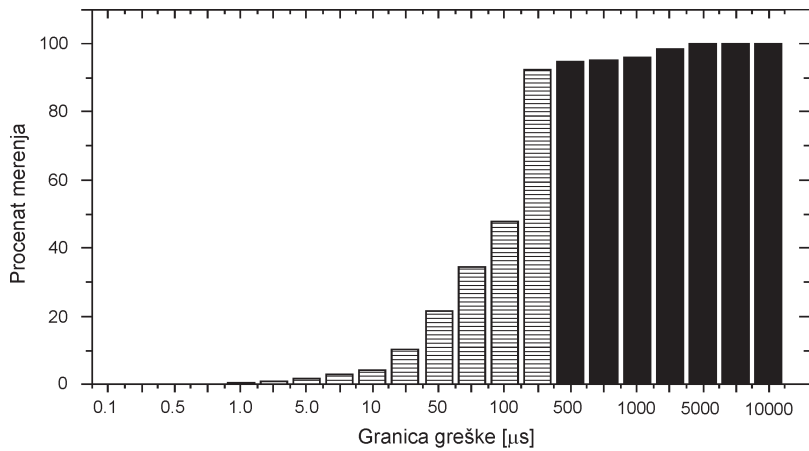
Slika 10.
 Ulazni signali kada dolazi do znatne pojave interferencije:
 A – signal sa prvog mikrofona
 B – signal sa drugog mikrofona
 C – kroskorelacija signala A i B

Figure 10.
 Input signal example with significant interference:
 A – signal from the first microphone
 B – signal from the second microphone
 C – cross-correlation of signals A and B

Greška pozicije 10 cm ekvivalentna je kašnjenju od $250 \mu\text{s}$. Procenat merenja koja imaju grešku ne veću od $250 \mu\text{s}$ je 92%. U daljoj analizi korišćena su merenja koja ispunjavaju ovaj uslov, kako bi se zanemario uticaj greške kroskorelacije na optimizacione metode.

Takođe, ispitana je i prostorna raspodela greške kroskorelacije koja ukazuje da ne postoji pravilnost raspodele greške kroskorelacije. Prostorna raspodela greške prikazana je na slici 12.

Korelacija između gešaka lokalizacije Nelder–Mead metodom i gešaka lokalizacije gradient descent metodom iznosi 0.885 i statistički je značajna ($p < 0.05$), što ukazuje da su greške lokalizacije ovih dveju metoda približno jednake.



Slika 11.
Kumulativna raspodela greške kroskorelacije

Figure 11.
Cumulative distribution of cross-correlation error

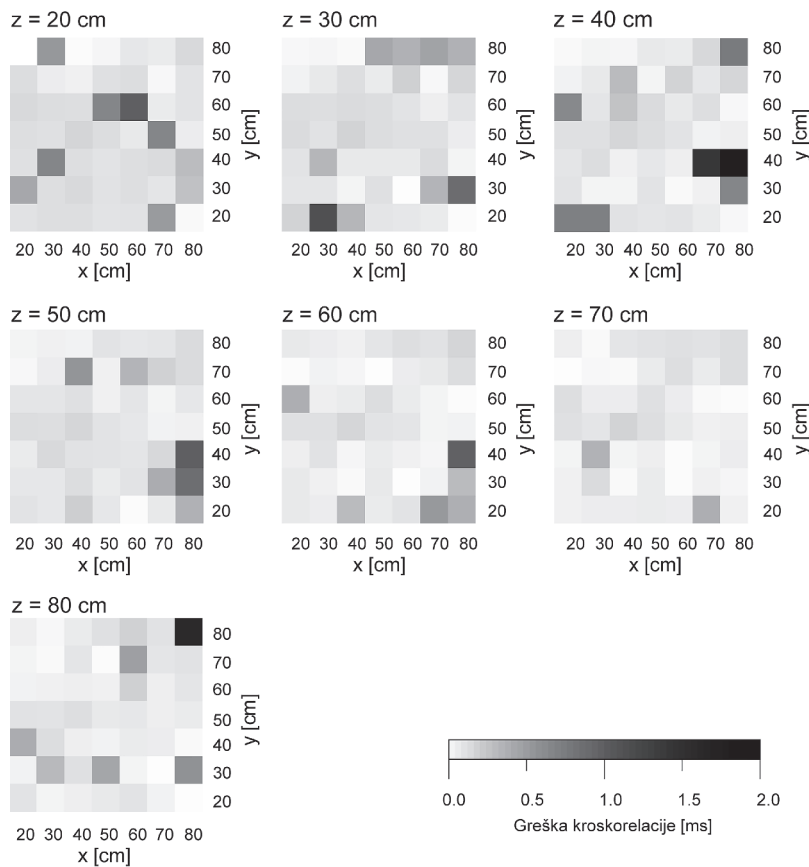


Figure 12.
Prostorna raspodela greške kroskorelacije

Figure 12.
Spatial distribution of cross-correlation errors

U tabeli 1 prikazane su prosečna greška, medijan greške i standardna devijacija greške optimizacionih metoda. Greška lokalizacije gradient descent metodom je $\Delta l_{gd} = (4 \pm 2)$ cm, a greška lokalizacije Nelder–Mead metodom $\Delta l_{NM} = (4 \pm 2)$ cm. Standardna devijacija grešaka je visoka, te se ne može zaključiti koji je metod pouzdaniji, niti precizniji.

Dobijene vrednosti manje su od 5 cm, što predstavlja dimenzije izvora zvuka, tj. minimalnu merivu neodređenost metode. Pri brzini odabiranja ADC-a od 100 kHz, očekivana preciznost je manja od 5 mm, jer je najmanja meriva razdaljina jednaka putu koji zvuk pređe između dva uzastopna merenja i iznosi oko 3.4 mm (zavisno od trenutne brzine zvuka), a očekivana pouzdanost je 5 cm zbog veličine zvučnika.

Tabela 1. Pouzdanost i standardna devijacija rezultata lokalizacije

Metoda	Prosečna greška [cm]	Medijan greške [cm]	Standardna devijacija greške [cm]
Nelder–Mead	3.7	3.6	1.3
Gradient descent	3.3	3.2	1.3

Zaključak

U radu je realizovan sistem za određivanje pozicije izvora zvuka sa 4 mikrofona i brzinom odabiranja ADC-a od 100 kHz. Korišćena tehnika za određivanje pozicije izvora zvuka je TDOA (time difference of arrival), pri čemu je kašnjenje signala određivano metodom kroskorelacije. Ispitivane su dve metode za optimizaciju: gradient descent i Nelder–Mead.

Upoređivane su pouzdanost, odnosno preciznost lokalizacije u zavisnosti od optimizacione metode. Izmerena pouzdanost gradient descent i Nelder–Mead metoda je 33 mm i 37 mm, respektivno, što je ispod dimenzija izvora zvuka. Preciznosti ovih metoda su jednake, sa standardnom devijacijom od 13 mm.

Izmerene greške lokalizacije ne razlikuju se značajno sa korišćenim optimizacionim metodama. Kriterijum zaustavljanja (određivanja kraja sekvence) optimizacione metode direktno utiče na grešku lokalizacije. U našoj implementaciji optimizacionih metoda uslov za prestanak gradient descent metode je detekcija oscilovanja, dok je prestanak Nelder–Mead metode uslovljen brojem iteracija. To sugeriše da bi sa većim brojem iteracija Nelder–Mead metoda dostigla manju grešku.

Refleksija zvuka utiče na lokalizaciju i dovodi do značajno uvećane greške kroskorelacije. Izborom pogodnog test-signala ovaj uticaj je potisnut na manje od 10% slučajeva. Najviše prostora za dalje unapređivanje sistema postoji u metodi za određivanje kašnjenja signala. Načini unapređenja su ili dodavanje informacija u kroskorelaciju, ili filtriranje signala, ili korišćenje neke potpuno drugačije metode. Takođe, unapređenje je moguće i u optimizacionim metodama. Implementiranje gradient descent metode sa

većim korakom bi značajno smanjilo broj iteracija potrebnih da se pronađe minimum, i povećalo pouzdanost. Unapređenje Nelder–Mead optimizacionog metoda je moguće u određivanju kraja sekvence, što bi dovelo do manjeg broja iteracija i pouzdanije procene lokacije, jer bi se izbegao slučaj da procenjena tačka i dalje nije konvergirala u minimum funkcije.

Istraživanje je moguće proširiti dodavanjem većeg broja mikrofona i ispitivanjem uticaja broja mikrofona na pouzdanost i preciznost. Očekuje se da bi se većim brojem mikrofona u većoj meri eliminisala interferencija reflektovanog i korisnog signala, jer bi se, na primer, sa 5 mikrofona mogla odrediti udaljenost bilo koja 4 mikrofona od izvora zvuka. Time bi se dobio veći broj tačaka, čijim se kombinovanjem može pouzdanije proceniti pozicija, pa bi se izbegao uticaj interferencije na jednom od mikrofona. Istraživanje je moguće proširiti i određivanjem uticaja brzine odabiranja na pouzdanost i preciznost lokalizacije, kao i ispitivanjem uticaja izgleda i veličine samog prostora i prepreka između izvora i mikrofona na pouzdanost i preciznost.

Literatura

- Ahlberg S. 2014. Evaluation of Different Radio-Based Indoor Positioning Methods. Independent thesis Advanced level (degree of master). Linköping University, Linköping, Sweden, str. 41-42. Dostupno na: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:726764/FULLTEXT01.pdf>
- Gustafsson F., Gunnarsson F. 2003. Positioning Using Time-Difference of Arrival Measurements. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, **6**: 553.
- Web 1. HITPOINT INC, Omnidirectional Electret Condenser Microphone (Foil Electret Type) - PMOF-9767NW-46U. Dostupno na: [https://www.schukat.com/schukat/pdf.nsf/index/F61948D5C5312923C1257266003B3F76/\\$file/PMOF-9767NW-46UQ.pdf](https://www.schukat.com/schukat/pdf.nsf/index/F61948D5C5312923C1257266003B3F76/$file/PMOF-9767NW-46UQ.pdf)
- Web 2. Kelco, RK3351 Mikrofonski predpojačavač
- Web 3. STMicroelectronics, 32F429IDISCOVERY - Discovery kit with STM32F429ZI MCU
- Web 4. Mikroelektronika, USB UART additional board
- Web 5. Gradient descent – <http://www.onmyphd.com/?p=gradient.descent&ckattempt=1>
- Web 6. Nelder–Mead – <http://www.webpages.uidaho.edu/~fuchang/res/ANMS.pdf>

Sound Source Localization in 3D Space Based on Time Difference of Arrival

The main goal of this project is the localization of a sound source under the assumption that there is no reflection on the walls of the room with an error less than 5 cm. Four omnidirectional microphones are distributed as shown in Figure 6. Using the method of cross correlation, applied to the pairs of the microphones, the time difference of arrival (TDOA) for a real system is calculated. TDOA is also calculated for the estimated position of the sound source that was randomly chosen in the first iteration. Based on the difference between the real system's TDOA and the estimated position's TDOA, error function is calculated as shown in eq. 3. The position of the sound source is obtained by finding the global minimum of the error function. For optimizing the function, Nelder–Mead and Gradient descent methods were used. The experimental setup is shown in Figure 7. Measurements were done in a soundproof room in order to suppress reflections and noise. For measurements, the space was discretized with a step of 10 cm and there were $7 \times 7 \times 7$ points where the measurements were taken. Since the measurement space is discrete it is assumed that Nelder–Mead will be more accurate than Gradient descent. Microphone signals are processed by the system shown in Figure 2. The STM32F4 DISCO development board with cortex M4 is used because of its speed as well as the appropriate peripherals that allow fast acquisition and processing of the signal. It is assumed that an ADC sampling rate of 100 kHz will provide precision less than 5 mm, and an accuracy of 5 cm, due to the speaker size. The emitted test signal is shown in Figure 9. The obtained accuracy of the Nelder–Mead method is 3.7 cm, while the accuracy of the Gradient descent method is 3.3 cm. Results also show that the precisions of both methods are equal to 1.3 cm. It is concluded that reflection significantly increases the crosscorrelation error in 10% of measurements.

