

# Senzor za detekciju akustičkih događaja u dalekom polju

Iva Salom, Dejan Todorović, Vladimir Čelebić

**Apstrakt**—Mikrofonski nizovi predstavljaju savremen inženjerski alat, koji se koristi za različite namene u raznim oblastima, kada je potrebno izvršiti ispitivanje izvora zvuka i/ili utvrđivanje njihovih položaja. Realizacija mikrofonskog niza kao akustičkog senzora na bespilotnoj letilici za nadgledanje iz vazduha je inovativna ideja autora, čije su primene širokog spektra, od monitoringa urbane i industrijske buke, preko bezbednosnog nadzora, spasilačkih misija, pa do praćenja divljih životinja. U radu je prikazana karakteristična realizacija ovakvog mikrofonskog niza u okviru multisenzorskog sistema na bespilotnoj letilici za konkretnu primenu nadgledanja pograničnih područja.

**Ključne reči**—akustički senzor, mikrofonski niz, beamforming, multisenzorski sistem, UAV.

## I. UVOD

MULTISENZORSKI sistemi za praćenje i nadgledanje imaju sve značajniju ulogu u različitim oblastima čovekove delatnosti, posebno sa napretkom tehnologije u oblasti različitih vrsta senzora i mrežnih i informacionih sistema, a sa druge strane globalnim smanjenjem bezbednosti [1], [2]. Standardna rešenja multisenzorskih sistema u najvećem broju slučajeva uključuju optičke i multispektralne kamere, IR (*InfraRed*) detektore, radarske sisteme, itd. [3]. Pod određenim uslovima, na primer u uslovima smanjene vidljivosti (gusta vegetacija, dim, loši vremenski uslovi sa maglom, ili na neki drugi način optički zaklonjene mete, koje dodatno predstavljaju izvore zvuka), nadgledanje detekcijom akustičkih događaja može u mnogome poboljšati pouzdanost i proširiti primenu multisenzorskog sistema. Stoga se u kontekstu multisenzorskih sistema sve češće pominje primena mikrofonskih nizova [2],[3].

Mikrofonski nizovi se sastoje od određenog broja mikrofona prostorno raspoređenih na odgovarajući način. Konfiguracija mikrofonskog niza utiče na rezultate obrade snimljenih signala [4]: frekvencijski opseg, prostornu rezoluciju, selektivnost (širinu glavnog luka i potiskivanje bočnih lukova), odnosno karakteristiku usmerenosti

(*beam pattern*), dinamički opseg. Nakon akvizicije audio signala mikrofonskim nizom vrši se obrada signala (*array processing*). Svi ovi algoritmi mogu se definisati kao prostorno filtriranje (*beamforming*), odnosno izdvajanje akustičkog signala iz određenog pravca (*Direction of Arrival - DoA*) [4]-[6]. Postoji veliki broj *beamforming* algoritama koji se razlikuju po svojim karakteristikama pa je za konkretnu primenu potrebno izabrati odgovarajući algoritam (preciznost, složenost u pogledu zahtevanih resursa, brzina, potreban broj signala itd.) [4]-[6],[7],[8].

Poslednjih godina sa rapidnim razvojem tehnologije bespilotnih letilica (*Unmanned Aerial Vehicle - UAV*) pojavljuju se i multisenzorski sistemi za praćenje i nadgledanje iz vazduha, koji su našli primenu u bezbednosnim sistemima, poljoprivredi, očuvanju životne sredine, spasilačkim misijama, itd. Multisenzorski sistemi se projektuju prema karakteristikama letilice, koja, između ostalog, mora da obezbedi dovoljnu nosivost, što je za današnje bespilotne letilice jedan od težih zahteva.

U okviru projekta BorderUAS [9] projektovana je specifična samostalna bespilotna letilica (*multi-role Lighter-Than-Air (LTA) UAV*), bazirana na posebno projektovanoj grafitnoj nosećoj konstrukciji unutar koje se nalazi balonet specifičnog oblika ispunjen helijumom, a dodatno ima 4 propelera sa motorima za upravljanje. Moguće visine leta su do 2 km, a radna visina leta će biti prilagođena multisenzorskom sistemu i realizaciji namene celog sistema. Letilica ima sopstveno napajanje, centralni procesorski sistem, a nosivost letilice je do 100 kg, što je omogućilo primenu velikog broja senzora: optičke kamere visoke rezolucije, hiperspektralnog optičkog senzora, SAR (*Synthetic Aperture Radar*), PTZ (*Pan-Tilt Zoom*) kamere, IR kamere (*Short Wave IR* i *Long Wave IR*) i akustičkog senzora. Osnovna namena letilice je kontinualni nadzor pograničnih područja, gde se prednost ovakvog sistema ogleda posebno u nadgledanju nepristupačnog terena, s ciljem otkrivanja ilegalnih prelazaka, krijumčarenja i slično, ali i primena tokom spasilačkih misija. Projekat uključuje i zemaljsku infrastrukturu pograničnih policija (komandno-kontrolni centar), inovativne modele podataka, kao i naprednu obradu, analizu sa klasifikacijom i skladištenje velike količine audio i video podataka.

U radu su prikazani specifični zahtevi koje su morali biti ispunjeni za akustički senzor koji će raditi u specifičnim uslovima, hardverska i softverska arhitektura, implementacija, kao i integracija u okviru multisenzorskog sistema.

Iva Salom – Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, Volgina 15, 11060 Beograd, Srbija (e-mail: [iva.salom@pupin.rs](mailto:iva.salom@pupin.rs)), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0002-2163-0939>)

Dejan Todorović – Dirigent Acoustics, Mažuranićeva 29, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: [dejan.todorovic@dirigent-acoustics.rs](mailto:dejan.todorovic@dirigent-acoustics.rs)), ORCID ID (<https://orcid.org/1234-1234-1234-123X>)

Vladimir Čelebić – Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, Volgina 15, 11060 Beograd, Srbija (e-mail: [vladimir.celebic@pupin.rs](mailto:vladimir.celebic@pupin.rs)) ORCID ID (<https://orcid.org/1234-1234-1234-123X>)

## II. SPECIFIČNI ZAHTEVI ZA AKUSTIČKI SENZOR

Zahtevi za akustički senzor su bili: detekcija i lokalizacija izvora zvuka na zemlji kroz generisanje akustičke mape odgovarajuće rezolucije, klasifikacija detektovanih izvora zvuka u audio signalu iz pravca dominantnog izvora zvuka, i slanje alarma u slučaju definisanih nepoželjnih izvora. Dodatno, prosleđuju se audio signali snimani za pravac dominantnog izvora zvuka, kao i za pravac odabran od strane operatera, kako bi mogli da se slušaju i analiziraju naknadno po potrebi. Definisane su osnovne grupe nepoželjnih izvora: čovek (govor, šapat), vozila, pucanj.

Najveći izazov pri projektovanju akustičkog senzora bila je detekcija akustičkih signala niskog nivoa (na primer, do 30 dB u slučaju govora) zbog slabljenja zvuka u vazduhu prilikom propagacije (-6 dB sa udvostručenjem rastojanja), kao i apsorpcije u vazduhu, naročito na visokim frekvencijama. Ovaj zahtev je uslovio dizajn akustičkog senzora kao i radne uslove. Pre svega, zahtevana je visina leta do 500 m.

Propeleri letilice predstavljaju značajan izvor buke. Pri tome, nivo buke koju stvaraju propeleri se očekuje da bude oko 30 dB iznad nivoa korisnog signala koji treba detektovati, tako da je potrebno primeniti tehnike potiskivanja koje bi značajno oslabile buku propelera i izdvojile koristan signal. Određena testiranja potiskivanja buke propelera su sprovedena primenom linearnog prediktora baziranog na LMS (*Least Mean Square*) algoritmu u dvokanalnom adaptivnom filtriranju [10]. Iako su neki od rezultata bili obećavajući (algoritam konvergira sa potiskivanjem buke od čak oko 30 dB sa odabranim delovima audio snimka) zaključeno je da postignuti rezultati nisu dovoljni da bi se zadovoljavajuće izvršilo detektovanje izvora zvuka koji dolazi sa zemlje. Stoga je postavljen zahtev da se motori isključe kada se vrši snimanje akustičkim senzorom.

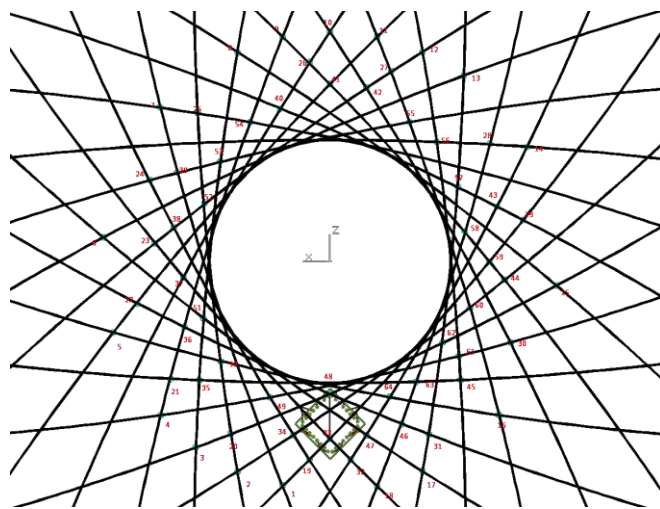
Pažljivo su odabrane odgovarajuće 1" pozlaćene mikrofonske kapsule visoke osetljivosti i niskog sopstvenog šuma, kardioidne karakteristike usmerenosti, dostupne na tržištu. Uzimajući u obzir električne i mehaničke zahteve realizovan je mikrofonski niz od 64 mikrofona čime je postignuto poboljšanje odnosa signal-šum (*Signal-to-Noise Ratio* – SNR) za 18 dB.

Procenjeni frekvencijski opseg krisknog signala koji dolazi sa zemlje je 200 Hz – 2 kHz. Gornja granična frekvencija je određena dimenzijom mikrofonskih modula, odnosno minimalnim rastojanjem između mikrofona. Dodatno, zbog apsorpcije u vazduhu ne očekuju se značajne komponente signala na višim frekvencijama.

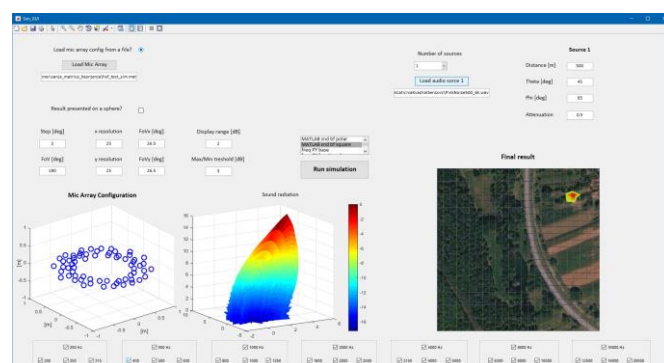
Jedan od zahteva definisale su mogućnosti postavljanja mikrofona na nosač letilice. Na osnovu 3D crteža grafitne konstrukcije letilice određivani su mogući položaji mikrofona i ispitivanja su vršena simulacijama u programskom paketu Matlab. Mikrofonu će biti motirani sa donje strane nosača letilice, prema rasporedu prikazanom na slici 1.

Na osnovu analize podataka koji se dobijaju u različitim senzorima u sistemu, odlučeno je da ugao gledanja FoV (*Field of View*) akustičke mape bude  $\pm 26.5$  stepeni, što znači da za visinu leta od 300 m, akustička mapa pokriva površinu od

300 m x 300 m. Na slici 2 prikazan je rezultat dobijen simulacijom u Matlabu za odabranu konfiguraciju mikrofonskog niza i FoV. Kao što će kasnije biti objašnjeno, u realizaciji je postignuta rezolucija akustičke mape 25 x 25 implementacijom konvencionalnog *delay-and-sum beamforming* algoritma u vremenskom domenu, i na slici 2 je prikazan rezultat simulacije za te podatke.



Sl. 1 Položaji mikrofona na grafitnoj konstrukciji letilice



Sl. 2 Rezultat simulacije za odabranu konfiguraciju mikrofonskog niza

## III. ARHITEKTURA SISTEMA

Arhitektura sistema akustičkog senzora sa interfejsom ka centralnom sistemu letilice prikazana je na slici 3. Akustički senzor se sastoji od tri bloka: senzorskog bloka, interfejsnog bloka i bloka za akviziciju i obradu signala. Senzorski blok se sastoji od mikrofonskog niza, koga čine 64 mikrofonska modula. Interfejsni blok povezuje mikrofonski blok sa blokom za akviziciju i obradu signala, kao i blok za akviziciju i obradu signala sa centralnim sistemom letilice.

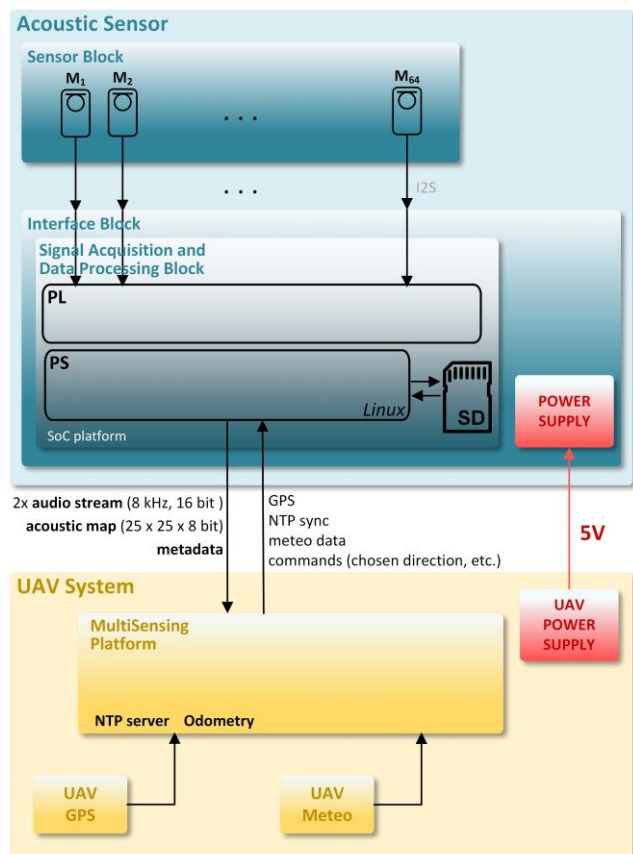
### A. Arhitektura hardvera

Arhitektura hardvera bazirana je na dva modula: mikrofonskom modulu i centralnom modulu, koja su razvijena i proizvedena za potrebe projekta.

Svaki mikrofonski modul sadrži mikrofonsku kapsulu i štampanu ploču sa analognim i digitalnim oblastima. Mikrofonski modul sadrži sledeće blokove: napajanje, konvertor visoke impedanse (HiZ), mikrofonski niskošumni predpojačavač sa filtrim, AD konvertor i interfejs ka

centralnom modulu.

Par mikrofonskih modula, „levi“ i „desni“, povezani su sa centralnim modulom 8-žilnim flet kablom, gde se položaj mikrofona („levi“/„desni“) bira pomoću prekidača na mikrofonskom modulu. Na ovaj način je duplo samnjen broj potrebnih interfejsnih kablova, kao i 8-pinskih konektora na mikrofonskom i centralnom modulu.



Sl. 3 Arhitektura sistema akustičkog senzora sa interfejsom ka centralnom sistemu letilice

Blok za napajanje uključuje napone 5 V i 3.3 V, koji se dovode sa centralnog modula 8-žilnim interfejsnim kablom, generisanje potrebnih napona napajanja od 5 V i 10 V za komponente za modulu, kao i „fantomskog“ napajanja od 71 V za mikrofonsku kapsulu, čime je postignuto povećanje osjetljivosti.

Niskošumni mikrofonski predpojačavač zajedno sa odgovarajućim filterima ostvaruje pojačanje mikrofonskog signala 200.

Za ovu primenu odabran je TI PCM4201 AD konvertor [11] zbog niskog sopstvenog šuma, niskog faktora izobličenja i male potrošnje, sa podržanim frekvencijama odabiranja od 8 kHz do 108 kHz. S obzirom na procenjeni frekvencijski opseg korisnog signala odabrana je frekvencija odabiranja od 8 kHz. Izlaz iz ovog konvertora je 24-bitni *left-justified* PCM signal, koji se može dekodovati kao I2S signal [12].

Na centralnom modulu se generišu 3 signala takta potrebna za AD konvertor, koji radi u *slave* modu: sinhronizacija frejma (FSYNC) – 8 kHz, bit takt (BCK) – 512 kHz i sistemski takt (SCK) – 2048 kHz. Ovi signali se dovode 8-

žilnim interfejsnim kablom. Maksimalna dužina kabla za projektovanu konfiguraciju niza (slika 1) je 2.4 m i ispunjava zahteve integriteta za pomenute brzine signala, što je provereno i simulacijama.

Podaci sa „levog“ i „desnog“ mikrofona vode se preko jedne linije podataka, a prebacivanje sa jednog na drugi mikrofona vrši se u ritmu FSYNC takta.

Centralni modul se sastoji od interfejsne ploče, koja sadrži 32 8-pinska konektora za povezivanje sa mikrofonskim modulima, 3 x 4 bafera za pomenute taktove, filtre za napajanje od 5 V, koje se dovodi sa letilice, i 2 konektora za povezivanje sa Z-turn modulom. Z-turn [13] je procesorski sistem na centralnom modulu – gotovo rešenje, koje predstavlja *Single Board Computer* (SBC) baziran na *Xilinx Zynq-7020* platformi [14] i odabran je zbog dovoljnog broja digitalnih I/O pinova za povezivanje mikrofonskih modula, kao i veličine DDR3 RAM memorije od 1 GB. *Xilinx Zynq-7020*, čip iz familije *Xilinx All Pro-programmable System-on-Chip* (SoC), uključuje dvojezgrani ARM Cortex A-9 procesor (*Processing System* – PS) i FPGA (*Field Programmable Gate Array*) programabilnu logiku iz serije *Xilinx-7* (*Programmable Logic* – PL).

Pored napajanja od 5 V koje se dovodi sa letilice, Z-turn je povezan *Ethernet* interfejsom sa *switch*-em na letilici.

## B. Arhitektura sofera

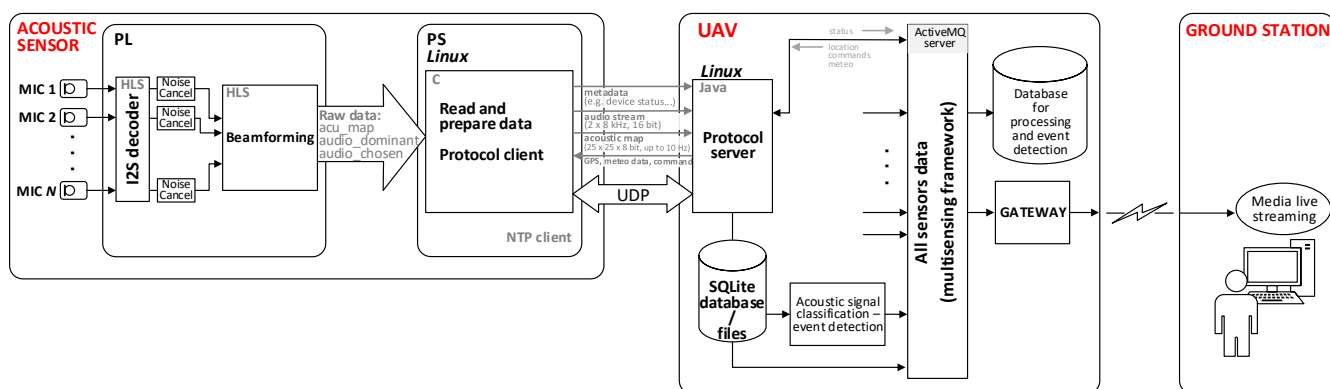
Arhitektura sofera prikazana je na blok dijagramu na slici 4. Akvizicija signala i *beamforming* algoritam realizovani su u okviru PL dela, u razvojnom okruženju Vivado Design Suite 2020.2, koje, između ostalog, pruža mogućnost dizajniranja pojedinih delova sistema u vidu IP (*Intellectual Property*) blokova pomoću Vivado HLS (*High-Level Synthesis*) softverskog paketa za projektovanje na osnovu algoritama pisanih u nekom od viših programskih jezika, kao što je C/C++. Akvizicija signala realizovana je u IP HLS bloku *tdm\_stream\_receiver*, dok je konvencionalni *delay-and-sum beamforming* algoritam u vremenskom domenu realizovan u IP HLS bloku *polar\_stream*.

Izlazi iz IP HLS bloka *polar\_stream* su sledeći: akustička mapa u formi 625 32-bitnih celobrojnih vrednosti koje predstavljaju vrednost svakog od 25 x 25 polja, sa periodom od 1 s, i 24-bitni audio odbirci za dominantni i izabrani smer, dužine 125  $\mu$ s, koji se prosleđuju PS delu preko AXI-Stream FIFO bloka. Dodatno se, za potrebe testiranja, svakih 10 ms prosleđuje signal sa odabranog mikrofona (po 80 obiraka preko još jednog AXI-Stream FIFO bloka).

PS je baziran na *Linux Ubuntu 20.04* operativnom sistemu. Realizovana je jedna C aplikacija, koja vrši prijem podataka sa PL dela u realnom vremenu preko dva AXI-Stream FIFO i deljene memorije. U aplikaciji se svake sekunde generišu 3 fajla: *bmp* fajl koji predstavlja akustičku mapu (25 x 25 piksela, 8 bita po pikselu), i 2 *wav* fajla (8 kHz, 16 bita po odbirku) za dominantni i izabrani smer.

Akustička mapa se izračunava primenom *beamforming* algoritma koristeći matricu kašnjenja, koja zavisi od konfiguracije mikroonskog niza (međusobnog položaja mikrofona), meteoroloških podataka, posebno brzine i smera





Sl. 4 Arhitektura sofvera akustičkog senzora

vetra (što utiče na brzinu prostiranja zvuka u vazduhu), kao i zadatog FoV. Matrica kašnjenja se izračunava u PS delu na osnovu pomenutih parametara, gde su položaji mikrofona fiksni ulazni parametar, i prosleđuje ka PL delu.

Centralni sistem letilice takođe je baziran na *Linux Ubuntu 20.04* operativnom sistemu i ostvaruje komunikaciju sa svakim od senzora. Odgovarajuće aplikacije i softverski moduli za svaki od senzora implementirani su u okviru *docker container image-a* [15].

Aplikacija na centralnom modulu akustičkog senzora komunicira sa centralnim sistemom letilice koristeći razvijeni komunikacioni (*proprietary*) protokol preko UDP (*User Datagram Protocol*) paketa. Aplikacija šalje generisane fajlove ka centralnom sistemu letilice svake sekunde. Aplikacija istim protokolom prima potrebne podatke sa letilice: meteorološke podatke (temperatura, vlažnost vazduha, atmosferski pritisak, brzina i smer vetra), GPS podatke, i komande iz komandno-kontrolnog centra. Na strani letilice razvijena JAVA aplikacija, pokrenuta u okviru *docker container image-a*, prima podatke sa akustičkog senzora i smešta ih na fajl sistem kao fajlove odgovarajućeg naziva, koji sadrži i informaciju o trenutku akvizicije (*time-stamp*), kao i u *SQLite* bazu podataka kao BLOB polja u odgovarajućim tabelama (*acu\_map*, *audio\_dir\_dominant*, *audio\_dir\_chosen*).

Letilica poseduje GPS prijemnik, koji daje informacije o trenutnom položaju letilice i tačnom vremenu. Ovi podaci se prosleđuju ka svakom od senzora i u komandno-kontrolnom centru služe za sinhronizaciju i lokalizaciju podataka dobijenih sa različitih senzora. Na centralnom sistemu letilice je podignut NTP (*Network Time Protocol*) server, dok je na centralnom modulu akustičkog senzora podignut NTP klijent za sinhronizaciju tačnog vremena.

Osnovni zadatak multisenzorskog sistema je detekcija i lokalizacija neželjenih događaja i slanje alarma ka kontrolno-komandnom centru. U slučaju akustičkog senzora, na osnovu polja u akustičkoj mapi u kome je detektovan dominantni izvor zvuka, i GPS koordinata i smer letilice, proračunavaju se GPS koordinate dominantnog izvora zvuka. Klasifikacija izvora zvuka se vrši nad audio signalima dominantnog izvora zvuka.

Razmena podataka iz komandno-kontrolnog centra sa senzorima vrši se preko *ActiveMQ* sistema za razmenu poruka između različitih aplikacija [16]. U slučaju akustičkog senzora, *ActiveMQ* prijemnik i predajnik su realizovani u okviru JAVA aplikacije, sa jasno definisanim telom poruke.

#### IV. REALIZACIJA AKUSTIČKOG SENZORA

Na slikama 5 i 6 prikazani su realizovani mikrofonski i centralni modul. Na slici 7 prikazan je mikrofonski modul upakovan u odgovarajuće dizajnirano i odštampano plastično kućište, koje je obloženo aluminijumskom folijom, obezbeđujući EMI (*ElectroMagnetic Inteference*) zaštitu. Na slici je prikazana i zaštita od vetra (*wind shield*).

Ukupna težina akustičkog senzora (centralnog i 64 mikrofonska modula) iznosi 15 kg.

Za potrebe testiranja akustičkog senzora proizvedeni mikrofonski moduli su pričvršćeni na ploču od specijalne pene obložene kartonom, kao što je prikazano na slici 8. Raspored mikrofona odgovara rasporedu na letilici u horizontalnoj ravni, dok se smatra da odstupanja u vertikalnoj ravni nisu značajna, mada mogu samo dodatno popraviti detekciju zvuka iz željenog smera. Dijametar projektovanog akustičkog senzora je 2 m.

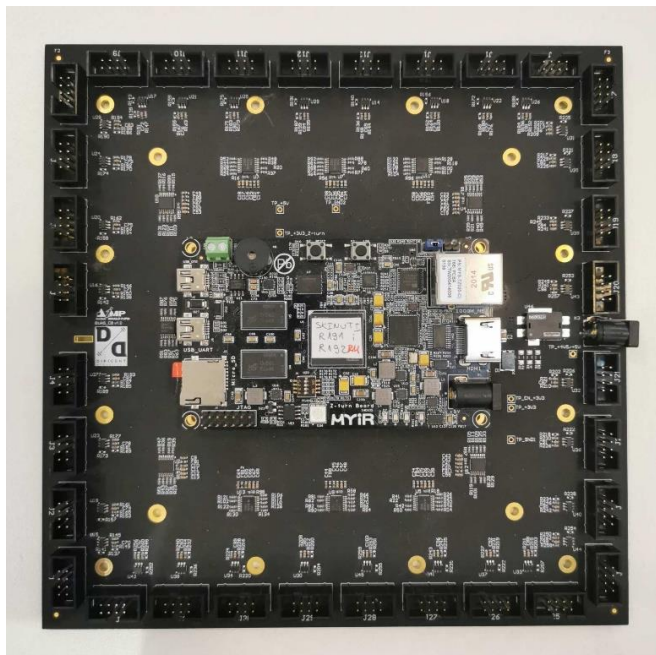


Sl. 5 Realizovani mikrofonski modul

Izmerena potrošnja akustičkog senzora je oko 8 A pri naponu napajanja od 5 V, odnosno 40 W. Prilikom dovođenja napajanja na akustički senzor dolazi do poznate pojave visokih vrednosti trenutne struje (*inrush current*) od 12 A. Za potrebe testiranja je obezbeđeno napajanje odgovarajućih

karakteristika.

Za potrebe testiranja JAVA aplikacija se može pokrenuti na laptop računaru, koji je povezan *Ethernet* interfejsom sa akustičkim senzorom.



Sl. 6 Realizovani centralni modul sa Z-turn modulom

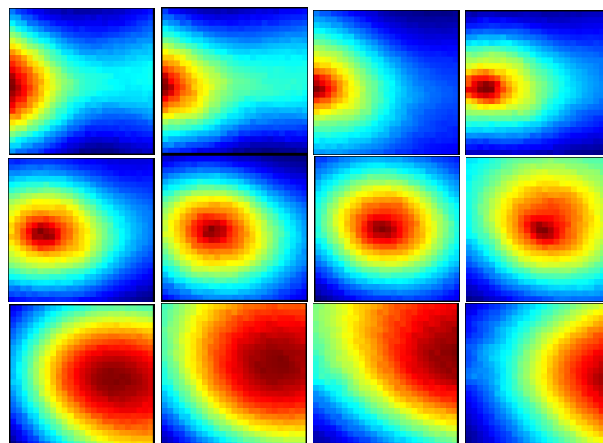


Sl. 7 Realizovani mikrofonski modul sa EMI kućištem i zaštitom od vetra (*wind shield*)

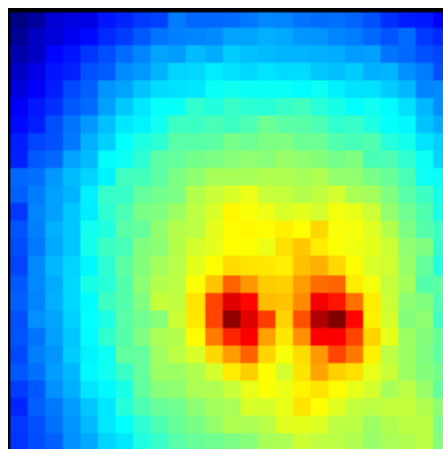
Testovi su sprovedeni na otvorenom prostoru sa različitim izvorima zvuka. Na slici 9 prikazani su rezultati snimka automobila koji je prošao na udaljenosti od 100 m od akustičkog senzora, što znači da akustička mapa prikazuje površinu 100 m x 100 m. Na slici 10 prikazana je akustička mapa dobijena snimanjem dva izvora roze šuma na rastojanju od oko 20 m od akustičkog senzora i na međusobnom rastojanju od oko 5 m.



Sl. 8 Realizovani test model akustičkog senzora



Sl. 9 Snimljene akustičke mape za automobil koji prolazi na rastojanju od 100 m od akustičkog senzora



Sl. 10 Snimljena akustička mapa dva izvora, međusobno udaljena 5 m i na rastojanju od oko 20 m od akustičkog senzora

## V. ZAKLJUČAK

U radu je opisana hardverska i softverska realizacija akustičkog senzora za primenu detekcije akustičkih događaja u dalekom polju, konkretno za akviziciju iz vazduha, kao deo multisenzorskog sistema za nadgledanje pograničnih područja. Senzor je testiran na otvorenom prostoru za različite izvore zvuka i potvrđen je ispravan rad senzora za detekciju dominantnih izvora zvuka.

Uzimajući procenjene mogućnosti procesorskog sistema na kome je implementirana akvizicija akustičkih signala i konvencionalni *delay-and-sum beamforming* algoritam, realizovana je akustička mapa veličine 25 x 25, što na visini letenja od 300 m i FoV od  $\pm 26.5$  stepeni daje rezoluciju od 12 m. Iako za konkretnu primenu ova rezolucija jeste prihvatljiva, jedna od smernica optimizacija implementacije postojećeg algoritma i povećanje rezolucije.

Takođe, jedna od smernica daljeg razvoja je implementacija i testiranje drugih *beamforming* algoritama.

Glavni test rada razvijenog akustičkog senzora biće montiranje na bespilotnu letilicu zajedno sa ostalim senzorima.

## ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansiran od strane Evropske komisije kroz *Horizon 2020 – Research and Innovation Framework Programme* u okviru projekta BorderUAS (883272), kao i od strane Ministarstva obrazovanja, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

## LITERATURA

- [1] G. L. Foresti, C. S. Regazzoni, P. K. Varshne, *Multisensor Surveillance Systems: The Fusion Perspective*, 2003<sup>rd</sup> ed., New York, Springer 2003
- [2] M. Crocco, M. Cristani, A. Trucco, V. Murrino, "Audio Surveillance: a Systematic Review," arXiv:1409.7787, Sept. 2014
- [3] S. Grubeša, J. Stamać, M. Suhanek, A. Petošić, Use of Genetic Algorithms for Design an FPGA-Integrated Acoustic Camera. *Sensors* 2022, Vol. 22, Page 2851 2022, 22, 2851, doi:10.3390/S22082851

- [4] J. Benesty, J. Chen, Y. Huang, "Microphone array signal processing," Springer, 2008.
- [5] H. L. Van Trees, "Optimum array processing – Part IV of detection, estimation and modulation theory," John Wiley & Sons Inc, 2002.
- [6] M. Brandstein, D. Ward, editors, "Microphone Arrays, Signal Processing Techniques and Applications," New York : Springer-Verlag, 2001.
- [7] M. M. Erić, "Some Research Challenges of Acoustic Camera," 19th TELFOR 2011, Conf. Proc. pp. 1036-1039, Serbia, Belgrade, November 22-24, 2011.
- [8] R.A. Mucci, "A comparison of efficient beamforming algorithms," IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol. 32, No. 3, pp. 438-557, 1984.
- [9] H2020 Research and Innovation Framework Programme: project BorderUAS Semi-autonomous border surveillance platform combining next generation unmanned aerial vehicles with ultra-high-resolution multi-sensor surveillance payload (grant agreement no. 883272)
- [10] V. Ikodinović „Potiskivanje buke drona pomoću dvokanalnog sistema aktivne kontrole buke,“ diplomski rad, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 2022
- [11] <https://www.ti.com/product/PCM4201>
- [12] I2S bus specification, Philips Semiconductors, 1996
- [13] <https://www.myirtech.com/list.asp?id=502>
- [14] Xilinx: Zynq-7000 All Programmable SoC Technical Reference Manual, UG585 (v1.12.1), December 6, 2017, <http://www.xilinx.com>
- [15] <https://www.docker.com>
- [16] <https://activemq.apache.org/>

## ABSTRACT

Microphone arrays represent a modern engineering tool, applied in various fields to examine sound sources and/or determine their positions. The application of a microphone array in an acoustic sensor mounted on an unmanned aerial vehicle for airborne acoustic monitoring is an innovative author's solution, having a wide range of applications, such as urban and industrial noise monitoring, rescue missions, security surveillance, and wildlife monitoring. The paper presents the specific implementation of such a microphone array within the multisensor system on an unmanned aerial vehicle for the specific application of border areas surveillance.

**Sensor for Far-Field Acoustic Event Detection**

Iva Salom, Dejan Todorović, Vladimir Čelebić