

Kombinovana ekvalizacija hidroфона i zvučnika u odsustvu referentnog senzora

Lara Kašca
School of Electrical Engineering,
University of Belgrade
Vlatacom Institute
Beograd, Srbija
lara.kasca@vlatacom.com
<https://orcid.org/0000-0002-9308-7314>

Stefan Ćirković
School of Electrical Engineering,
University of Belgrade
Vlatacom Institute
Beograd, Srbija
stefan.cirkovic@vlatacom.com
<https://orcid.org/0000-0001-8374-4010>

Miloš Bjelić
School of Electrical Engineering,
University of Belgrade
Beograd, Srbija
bjelic@etf.rs
<https://orcid.org/0000-0002-5859-1654>

Abstract— U ovom radu razmatra se mogućnost ekvalizacije signala dobijenog pomoću niskobudžetnog senzora u uslovima kada ni izvor zvuka tj. zvučnik, ni prijemni hidrofon nisu precizno karakterisani. Ovo predstavlja čestu situaciju u eksperimentalnoj podvodnoj akustici iz čega proističe motivacija rada, da se omogući pouzdana obrada akustičkih signala i u takvim ograničenim uslovima. Eksperimentalni sistem sastoji se od ručno izrađenog podvodnog zvučnika, čije frekventijske karakteristike nisu unapred poznate i seta niskobudžetnih hidroфона, postavljanih sukcesivno na malom rastojanju od zvučnika u vodi. Primenjen je NLMS adaptivni algoritam filtriranja, pri čemu je, u odsustvu visokokvalitetnog hidroфона, kao referentni signal korišćen direktno pobudni MLS signal emitovan sa zvučnika. Istraživanje je sprovedeno kao preliminarna faza u iščekivanju upotrebe referentnog hidroфона, koji bi omogućio standardni pristup ekvalizaciji, poređenjem odziva dva senzora. Dobijeni rezultati pokazuju stabilnu konvergenciju i konzistentnost procenjenih koeficijenata adaptivnog filtra na više merenja i na svim hidrofonima, čime se demonstrira da je moguće uspešno kompenzovati kombinovani uticaj nepoznatih karakteristika zvučnika i hidroфона, i bez referentnog hidroфона, te se potvrđuje izvodljivost predloženog pristupa.

Ključne reči—podvodna akustika, hidroфони, ekvalizacija, LMS algoritam

I. UVOD

Primene podvodne akustike danas mogu se podeliti u četiri grupe:

1. Vojne i bezbednosne primene: detekcija i praćenje brodova i podmornica, podvodna komunikacija itd. [1];
2. Monitoring i zaštita podvodnog ekosistema: praćenje migracija morskih organizama, procena uticaja buke i drugih ljudskih aktivnosti itd. [1];
3. Istraživanje i kartografija morskog dna i okruženja [1];
4. Geofizički monitoring i rano upozoravanje: detekcija cunamija, zemljotresa (seizmički podaci mogu se koristiti i u naftnoj industriji za eksploataciju gasa i mineralnih resursa), vulkanske aktivnosti, praćenje klimatskih promena itd. [1].

Ono što je zajedničko za sve primene je potreba za tačnim i preciznim merenjima kao osnova za pouzdane akustičke analize, naročito u primenama koje se odnose na lokalizaciju izvora zvuka.

Ovaj rad su finansirali Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije u okviru ugovora broj: 451-03-34/2026-03/200103 i Institut Vlatacom u okviru projekta P191.

U takvim scenarijima, informacije o vremenu dolaska, amplitudi i frekventijskom sadržaju signala direktno utiču na procenu položaja izvora, pa i najmanja neočekivana odstupanja u karakteristikama merne opreme mogu uneti sistematska izobličenja i time dovesti do značajnih grešaka u rezultatima. Zbog toga je primena kalibrisanih i ekvalizovanih instrumenata od ključnog značaja, jer omogućava verodostojno predstavljanje akustičkog polja. Posebno u podvodnoj akustici, gde složeni uslovi prostiranja zvuka dodatno utiču na signal, pravilna karakterizacija merne opreme predstavlja neophodan preduslov za uspešnu lokalizaciju i druge napredne analize.

Ekvalizacija predstavlja proces kompenzacije izobličenja sistema sa ciljem da se izlazni signal što više približi poznatom referentnom signalu, što sličnijem zvuku u realnosti. Zasniva se na poređenju odziva ispitivanog mikrofona ili hidroфона sa poznatim signalom [2]. Tipična primena jeste scenario u kome je dostupan samo jedan visokoprecizni senzor i veći broj senzora lošijeg kvaliteta, te se ekvalizacijom karakteristike lošijih dovode na nivo visokog, koji postaje referentni. Idealni scenario bio bi korišćenje isključivo visokokvalitetnih senzora.

Uloga referentnog hidroфона sa poznatim odzivom ogleda se u tome da on služi kao osnova za poređenje i tačnu procenu karakteristika ispitivanog senzora u istim akustičkim uslovima. Time se omogućava razdvajanje uticaja merne opreme, sa jedne strane, od stvarnih i realnih svojstava akustičkog polja i, najpre, izvora zvuka. U idealnom slučaju standardne ekvalizacije, koristi se visokoprecizni (*cutting-edge*) referentni hidrofon koji se tokom merenja postavlja neposredno pored ispitivanih senzora, respektivno. Ovakvom postavkom, oba hidroфона istovremeno registruju identičan akustički signal, što omogućava direktno poređenje njihovih izlaza za iste uslove. Pristup bez reference, s druge strane, oslanja se na indirektna poređenja i samim time predstavlja ograničenje, ali omogućava rad u uslovima kada odgovarajuća oprema nije dostupna. Hidroфони ovog tipa, koji mogu služiti kao dobra referenca, poput Brüel & Kjaer [3], odlikuju se širokim i stabilnim frekventijskim odzivom, uz fabričku kalibraciju svakog uređaja ponaosob. Cene se kreću od nekoliko hiljada do par desetina hiljada evra po jedinici, dostupni su uglavnom preko proizvođača, uz moguća ograničenja izvoza.

Niskobudžetni (*low-cost*) hidroфони predstavljaju atraktivno rešenje u akustici zbog svoje dostupnosti i niske cene, što ih čini pogodnim za širok dijapazon eksperimentalnih i edukativnih primena [4]-[6]. Međutim, njihova primarna mana je to što često

poseduju nepoznate ili nestabilne frekvencijske karakteristike, što otežava njihovu upotrebu u preciznim merenjima i zahtevnim akustičkim analizama.

Poznavanje frekvencijskog odziva zvučnika je takođe važno za ekvalizaciju, jer zvučnik neidealne karakteristike može dodatno izmeniti spektralni sadržaj signala. Zato je u ovom procesu potrebno uzeti u obzir odziv i izvora i senzora radi realnog prikaza akustičkog polja. U slučaju ovog rada, još jedno ograničenje predstavlja činjenica da nije raspoloživ ni okarakterisani zvučnik poznatog odziva pored referentnog hidrofona, već se kao izvor koristi ručno izrađeni podvodni zvučnik [7], što onemogućava potpunu separaciju uticaja samog predajnika i komplikuje standardni pristup.

U ovom radu predlaže se pristup ekvalizaciji frekvencijskih karakteristika niskobudžetnih hidrofona koji ne zahteva *cutting-edge* senzor poznatog odziva. Umesto poređenja sa izlazom referentnog hidrofona, odziv ispitivanog hidrofona poredi se direktno sa pobudnim signalom, čime se eliminiše potreba za skupom opremom. Adaptivni NLMS algoritam koristi se za određivanje koeficijenata ekvalizacionog filtra, koji kompenzuju izobličenja nastala hidrofonom. Predloženi pristup validiran je na setu od osam niskobudžetnih hidrofona u laboratorijskim uslovima, u vodenoj zapremini. Ključni doprinos rada ogleda se u demonstraciji da je moguće postići pouzdanu ekvalizaciju bez ikakvog referentnog senzora, što predstavlja značajno proširenje primenjivosti metode u scenarijima gde referentna oprema nije dostupna.

Rad je organizovan na sledeći način: drugo poglavlje uvodi korišćeni adaptivni algoritam i opisuje eksperimentalnu postavku merenja; treće poglavlje daje pregled rezultata i u poslednjem poglavlju, zaključku, se sumira urađeno i ističu novine rada.

II. METODOLOGIJA

A. LMS algoritam

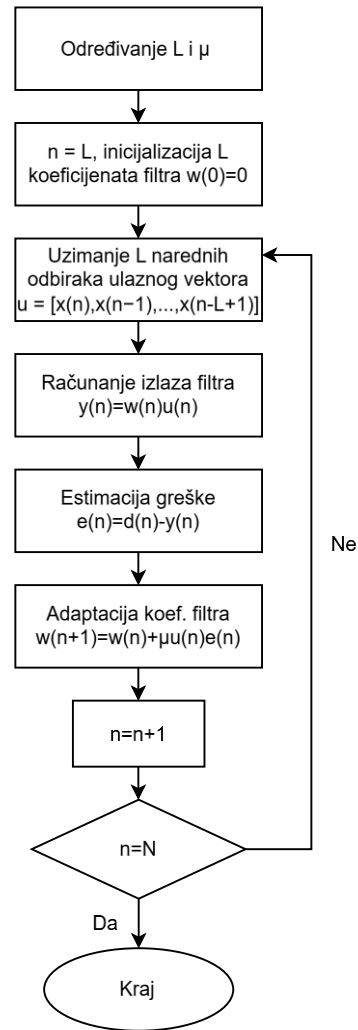
Za pobudni signal je korišćena MLS sekvenca [8] trajanja 15 s ponovljena šest puta (u daljem tekstu: segmenti) radi provere ponovljivosti rezultata i pouzdanosti ekvalizacije. Za ekvalizacioni algoritam je korišćen LMS algoritam [2]. LMS algoritam je linearni adaptivni algoritam filtriranja koji se bazira na iterativnom podešavanju koeficijenata filtra w , kako bi se izlazni signal nakon filtriranja koeficijentima iz trenutne iteracije što više približio referentnom signalu. Ovaj algoritam je poznat algoritam u obradi signala, a u ovom radu je njegova definicija preuzeta iz [2]. Za LMS algoritam potrebno je da budu poznati željeni odziv $d(n)$, kao i ulazni signal $x(n)$ iz koga se kroz iteracije izdvaja prozor $u(n)$. Greška procene $e(n)$ definiše se kao razlika između željenog odziva $d(n)$ i stvarnog izlaza filtra $y(n)$, gde se izlaz dobija kao $w(n) \cdot u(n)$. Za inicijalne vrednosti filtra se najčešće uzima vektor svih nula. Varijable u sistemu su dužina filtra, odnosno broj koeficijenata L i korak učenja μ o kom će kasnije biti više reči. Prozor $u(n)$ predstavlja poslednje učitanih L odbiraka ulaznog signala, što po logici stvari dalje povlači da su nizovi d , e i naravno w iste dužine, L . Dijagram toka LMS algoritma može se kompaktno opisati pomoću Sl. 1.

U razmatranom scenariju, LMS algoritam nije uspeo da iskonvergira te je korišćen NLMS [9]. NLMS (engl. *Normalized LMS*) je poboljšana verzija LMS algoritma u kojoj se korak

učenja normalizuje snagom ulaznog signala, čime se postiže stabilnije i brže prilagođavanje. Adaptacija koeficijenata (šesti blok sa slike) se menja u:

$$w(n+1) = w(n) + \frac{\mu}{u \cdot u} \cdot u(n) \cdot e(n).$$

Korak učenja μ određuje brzinu prilagođavanja koeficijenata adaptivnog filtra. Veće vrednosti μ omogućavaju bržu konvergenciju, ali mogu dovesti do većih oscilacija i nestabilnosti, dok manje vrednosti rezultuju sporijom, ali stabilnijom konvergencijom i manjom greškom. Dovoljna dužina signala dozvoljava sporiju konvergenciju, što je uslov koji je ovde ispunjen.



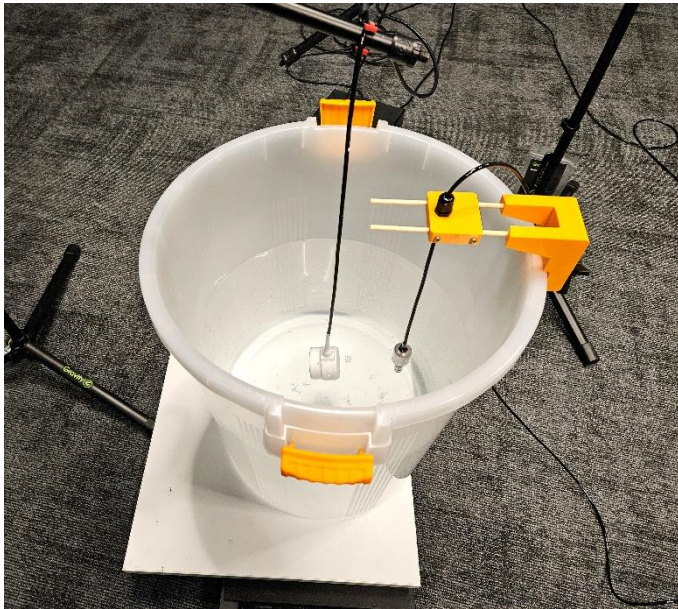
Sl. 1 Dijagram toka LMS algoritma

B. Eksperimentalna postavka

Eksperiment je sproveden u kofi ispunjenoj vodom, pri čemu su hidrafon od interesa i zvučnik bili postavljeni na veoma malom međusobnom rastojanju, oko 3 cm (Sl. 2). Kao izvor zvuka korišćen je ručno izrađeni podvodni zvučnik čija je konstrukcija i karakterizacija detaljno opisana u [7]. Ovakva konfiguracija omogućila je minimizaciju uticaja refleksija od zidova posude i drugih akustičkih efekata okruženja. Set

korišćenih hidrofona sastojao se od osam niskobudžetnih hidrofona koji su jedan po jedan postavljani u vodu.

Voda kao akustički medijum karakteriše se znatno manjim slabljenjem zvučnih talasa u poređenju sa vazduhom, kao i velikom akustičkom impedansom, što dovodi do izraženih refleksija na granicama različitih sredina (voda–vazduh, voda–zid posude). U ograničenim zapreminama, kakva je i posuda korišćena u ovom eksperimentu, ove refleksije mogu izazvati *multipath* komponente i pojavu stojećih talasa. U cilju minimizacije ovih neželjenih efekata, zvučnik i hidrofoni od interesa su, kao što je već rečeno, postavljeni na malom međusobnom rastojanju, čime je obezbeđena dominacija direktnog talasa u odnosu na reflektovane komponente. Smeštanjem eksperimentalne postavke u anehoničnu prostoriju (“gluvu sobu”), značajno je smanjen uticaj spoljašnjih akustičkih smetnji i mehaničkih vibracija koje bi se mogle preneti na posudu i uticati na rezultate merenja koji su dosta osetljivi. Iako refleksije unutar same posude ne mogu biti u potpunosti eliminisane, primenjena eksperimentalna postavka omogućava njihovo značajno ublažavanje i obezbeđuje pouzdanu procenu kombinovanog prenosa sistema koji čine zvučnik, vodeni medijum i ispitivani hidrofoni.



Sl. 2 Eksperimentalna postavka: kofa ispunjena vodom sa uronjenim hidrofonom (desno) i zvučnikom, pričvršćenim za stativ, na malom međusobnom rastojanju

III. REZULTATI I DISKUSIJA

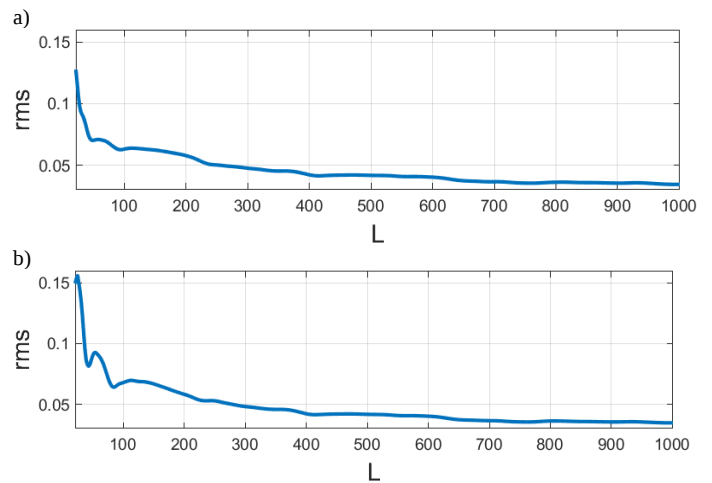
Za potrebe analize odabrana su četiri nasumična segmenta sa četiri različita hidrofona. Na ovim signalima primenjen je NLMS algoritam, pri čemu je broj koeficijenata (red filtra + 1) variran u opsegu od 21 do 1001. Analiza je sprovedena za više vrednosti koraka adaptacije, kako bi se ispitaio njegov uticaj na konačan rezultat i utvrdila optimalna vrednost. Pored fiksne vrednosti $\mu = 0.01$, razmatrana je i vrednost $\mu = 5/L$, kako bi se korak adaptacije na pogodan način stavio u vezu sa dužinom filtra. Za ovu analizu kao kvantitativna mera korišćen je RMS razlike idealnog signala, kome želimo da se približimo, i signala nakon filtriranja dobijenim koeficijentima. RMS (engl. *Root*

Mean Square (error)) greška računa meru koliko se dva signala razlikuju i matematički se izražava kao:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}$$

gde je x_i referentna/tačna vrednost, y_i izmerena vrednost, a N broj uzoraka. U ovom slučaju, u odsustvu kvalitetnog hidrofona, za idealni (novi referentni) signal je korišćen direktno pobudni signal. Signal snimljen ispitivanim hidrofonom i referentni su pre ulaska u algoritam propušteni kroz filter propusnik opsega od 100 Hz do 2700 Hz, u skladu sa frekvencijskim opsegom u kojem će se merna oprema koristiti u daljoj primeni, i predstavljaju y i x , respektivno.

Zavisnost RMS greške od navedenih parametara za neki od hidrofona prikazana je na graficima na Sl. 3. Sa grafika se uočava monotono opadanje RMS greške sa porastom L do oko $L \approx 400$, nakon čega kriva ulazi u zasićenje, što ukazuje da dalji porast reda filtra ne donosi značajno poboljšanje performansi. S obzirom na to da su razlike u odnosu na $\mu = 5/L$ minimalne, ali ipak blago u korist fiksne vrednosti $\mu = 0.01$, i imajući u vidu da fiksna vrednost ne zavisi puno od L u ovom scenariju, čime se pojednostavljuje implementacija, usvojena je vrednost $\mu = 0.01$. Što se tiče reda filtra, odabrana je vrednost $L = 451$, jer se na svim graficima uočava da nakon ove tačke dolazi do zasićenja performansi, odnosno kriva RMS greške se poravnava i dalja poboljšanja su zanemarljiva. Dodatno, analiza dinamike RMS vrednosti na y -osi ukazuje na to da bi eventualno smanjenje reda filtra dovelo do primetnijeg pogoršanja performansi. Iako konkretna hardverska platforma nije unapred definisana, njen izbor će biti usklađen sa zahtevima, kako bi se obezbedilo efikasno izvršavanje uprkos visokom redu filtra.

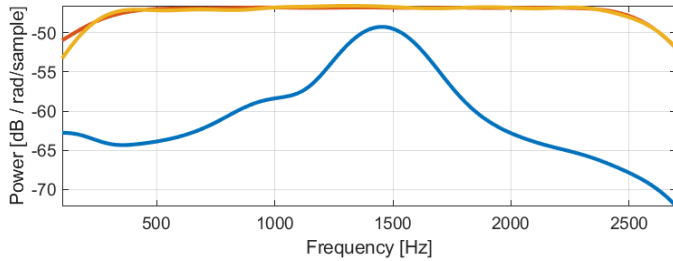


Sl. 3 Efektivna vrednost razlike referentnog signala i signala nakon filtriranja u funkciji broja koeficijenata za korak učenja a) $\mu = 0.01$, b) $\mu = 5/L$

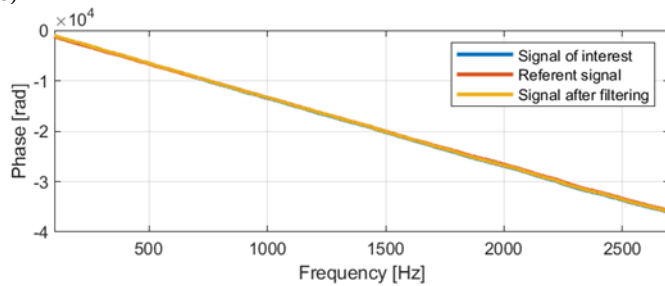
Da bi se direktno ilustrovao doprinos predloženog pristupa, na Sl. 4 prikazane su tri amplitudske karakteristike: polazna karakteristika sistema (pre ekvalizacije), idealna (referentna) karakteristika koja odgovara pobudnom signalu, i karakteristika sistema nakon ekvalizacije primenom dobijenih koeficijenata filtra. Polazna karakteristika sistema, koja predstavlja kombinovani odziv zvučnika, vodenog medijuma i ispitivanog

hidrofona, pokazuje izražena odstupanja od idealne karakteristike u celom posmatranom opsegu. Nakon primene ekvalizacionog filtra, amplitudska karakteristika se značajno približava idealnoj u celom opsegu od 100 Hz do 2700 Hz. Ovaj rezultat direktno potvrđuje da predloženi pristup, uprkos odsustvu referentnog hidrofona, uspešno kompenzuje kombinovani uticaj nepoznatih karakteristika izvora i senzora.

a)



b)

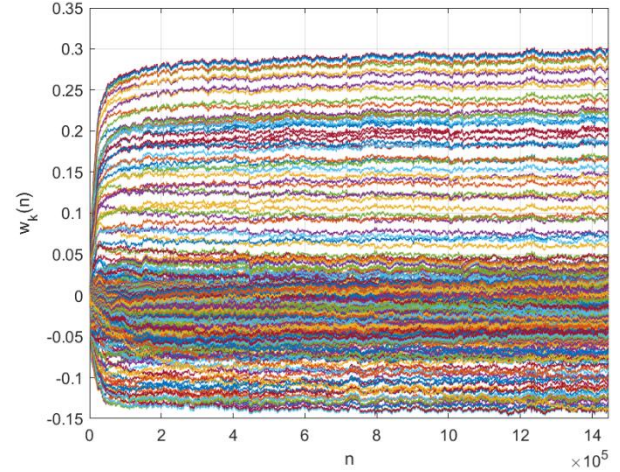


Sl. 4 (a) Amplitudska i (b) fazna karakteristika signala snimljenog hidrofonom (plavo), pobudnog MLS signala (narandžasto) i snimljenog signala nakon filtriranja dobijenim koeficijentima (žuto)

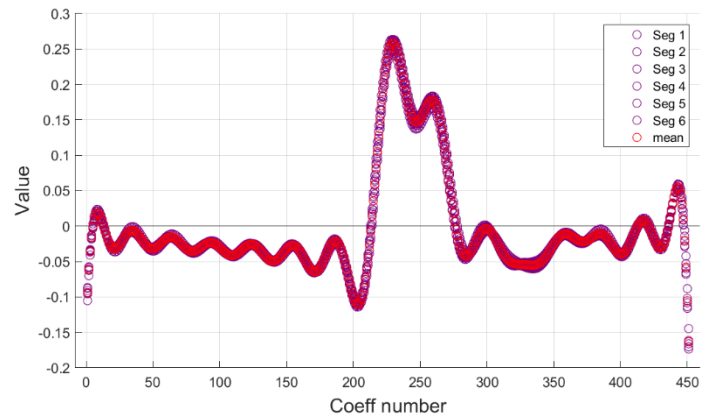
Vrednosti koeficijenata filtra su izračunate primenom NLMS algoritma na svim segmentima svakog hidrofona, a zatim za finalne skupove usrednjene nad segmentima. Konvergencija koeficijenata za jedan slučaj prikazana je na Sl. 5. Sa grafika se uočava da koeficijenti veoma brzo, već u prvih nekoliko stotina hiljada iteracija, dostižu stabilne vrednosti oko kojih u nastavku samo neznatno osciluju, što potvrđuje da je usvojeni korak adaptacije $\mu = 0.01$ obezbedio stabilno ponašanje algoritma. Raspodela koeficijenata prikazana je na Sl. 6, gde ljubičaste tačke predstavljaju vrednosti koeficijenata za svaki od šest analiziranih segmenata jednog hidrofona, dok crvena linija označava njihovu srednju vrednost. Uočava se veoma malo odstupanje između segmenata, što ukazuje na visoku konzistentnost i međusobnu sličnost dobijenih filtera.

U Tabeli 1 prikazane su kvantitativne mere varijabilnosti: srednja vrednost standardne devijacije koeficijenata i maksimalno odstupanje koeficijenata u odnosu na srednju vrednost $\max(|w - w_{mean}|)$. Iz tabele se uočava da je za većinu hidrofona srednja standardna devijacija koeficijenata reda 10^{-3} , a maksimalno odstupanje ispod 0.07, što potvrđuje visoku ponovljivost procene filtra kroz različite segmente istog hidrofona. Nešto više vrednosti kod nekih hidrofona, mogu se objasniti, osim mogućim sitnim razlikama u konstrukciji pojedinačnih senzora, mogućim varijacijama u pozicioniranju tokom merenja. Hidrofon 2 izdvaja sa redom veličine višim vrednostima nego ostali senzori. Naknadnom analizom snimaka utvrđeno je da je u jednom od šest segmenata došlo do eksterne smetnje, te povećana varijabilnost koeficijenata nije posledica

karakteristika samog senzora. Kada se sporni segment izuzme iz analize, vrednosti iz Tabele 1 koeficijenata hidrofona 2 padaju na 0.0072 i 0.0694, respektivno, što je u skladu sa rezultatima ostalih senzora. Uprkos ovom izuzetku, dobijeni rezultati potvrđuju da predloženi pristup obezbeđuje konzistentne koeficijente filtra na nivou pojedinačnog hidrofona, što je preduslov za pouzdanu primenu ekvalizacije.



Sl. 5 Evolucija koeficijenata tokom iteracija za broj koeficijenata $L = 451$ i korak učenja $\mu = 0.01$



Sl. 6 Raspodela vrednosti koeficijenata dobijena kroz segmente hidrofona broj 1 i njihova srednja vrednost

TABELA I. KVANTITATIVNE VREDNOSTI RASPODELE KOEFICIJENATA

Redni broj hidrofona	Srednja standardna devijacija	Maksimalno odstupanje
1	0.0034	0.0185
2*	0.0563	0.5086
3	0.0038	0.0660
4	0.0162	0.1920
5	0.0048	0.0362
6	0.0177	0.1082
7	0.0040	0.0263
8	0.0094	0.0570

*Vrednosti uključuju jedan segment koji zahteva dodatnu analizu. Bez tog segmenta: 0.0072 i 0.0694

Imajući u vidu da dobijeni koeficijenti odražavaju i specifičnosti same postavke (blisko polje, refleksije unutar posude – implicirano u poglavlju II), rezultate treba tumačiti kao dokaz izvodljivosti pristupa, dok bi validacija u većem ili anehoičnom bazenu bila prirodan nastavak istraživanja.

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu razmatran je problem ekvalizacije u uslovima kada nisu poznate frekvencijske karakteristike ni izvora ni prijemnog senzora, što predstavlja čestu situaciju u eksperimentalnoj podvodnoj akustici sa niskobudžetnom opremom. Motivacija rada proističe iz potrebe da se omogućiti pouzdana obrada i interpretacija akustičkih signala i u takvim ograničenim uslovima, gde primena standardnih kalibracionih procedura nije moguća. Značaj ovih rezultata ogleda se u potencijalnoj primeni u situacijama gde visokoprecizna merna oprema nije dostupna, poput edukativnih, terenskih ili preliminarne istraživanja.

Predloženi pristup zasniva se na upotrebi adaptivnog filtriranja NLMS algoritmom, pri čemu se kao referenca koristi pobudni MLS signal, umesto izlaza referentnog hidrofona. Na taj način izvršena je kompenzacija kombinovanog uticaja nepoznatih karakteristika izvora, medijuma i senzora. Dobijeni rezultati pokazuju stabilnu konvergenciju i konzistentnost procenjenih koeficijenata, čime je potvrđena izvodljivost ovakvog pristupa. Time se kao ključni doprinos rada izdvaja demonstracija da je ekvalizacija moguća i bez referentnog hidrofona, iako u ograničenom smislu.

Nastavak istraživanja išao bi u pravcu poređenja rezultata ovako opisane ekvalizacije sa posjedovanjem i primenom visokobudžetnog senzora i separacije uticaja pojedinačnih komponenti sistema.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je delimično realizovan u prostorijama Palate nauke, Zadužbini Miodraga Kostića.

REFERENCE/LITERATURA

- [1] Nano Science & Technology Consortium (NSTC), Computational Ocean Acoustics: Propagation Modeling and Sonar Signal Processing, lecture notes on online workshop, Jan. 12–14, 2026.
- [2] O. Jovanović, M. Bjelić, and J. Čertić, "Equalization frequency characteristics of the microphone for acoustic camera," in *IcETRAN*, Kladovo, Jun. 2016.
- [3] Brüel & Kjær, "Hydrophone Types 8103, 8104, 8105 and 8106," Hottinger Brüel & Kjær A/S, Nærum, Denmark, Product Data BP 0317–23, 2021. [Online]. Dostupno na: <https://www.bksv.com/media/doc/bp0317.pdf>
- [4] J. Xu, et al., "Low-cost, tiny-sized MEMS hydrophone sensor for water pipeline leak detection," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 8, pp. 6374–6382, 2018.
- [5] R. De Marco, et al., "The development of a low-cost hydrophone for passive acoustic monitoring of dolphin's vocalizations," *Remote Sens.*, vol. 15, no. 7, p. 1946, 2023.
- [6] L. Chapuis, et al., "Development of a low-cost hydrophone for research, education, and community science," in *OCEANS 2024–Halifax*, 2024, pp. 1–7.
- [7] S. Ćirković, L. Kašca, and M. Bjelić, "Realizacija podvodnog inercijalnog zvučnika sa rigidnim kućištem i DML elektroakustičkim pretvaračem," in *IcETRAN*, Srebno jezero, Jun. 2026, (*u štampi*).
- [8] S. Mitra, "On the properties of pseudo noise sequences with a simple proposal of randomness test," *World Acad. Sci., Eng. Technol.*, vol. 2, pp. 631–636, 2008.

- [9] S. Haykin, *Adaptive filter theory*, 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.

ABSTRACT

This paper investigates the possibility of equalizing signals obtained from a low-cost sensor in conditions where neither the sound source (speaker) nor the receiving hydrophone are precisely characterized. This represents a common situation in experimental underwater acoustics, which motivates the goal of enabling reliable acoustic signal processing even under such constrained conditions. The experimental system consists of a custom-built underwater speaker with unknown frequency characteristics and a set of low-cost hydrophones, placed successively at close range from the speaker in water. An NLMS adaptive filtering algorithm was applied, where, in the absence of a high-quality reference hydrophone, the excitation MLS signal emitted by the speaker was used directly as the reference signal. The study was conducted as a preliminary phase in anticipation of using a high-quality reference hydrophone, which would enable a standard equalization approach by comparing the responses of two sensors. The obtained results demonstrate stable convergence and consistency of the estimated adaptive filter coefficients across multiple measurements and all hydrophones, confirming that it is possible to successfully compensate for the combined influence of the unknown characteristics of both the speaker and the hydrophones — even without a reference hydrophone — thus validating the possibility of the proposed approach.

Combined hydrophone and speaker equalization in the absence of a reference sensor

Lara Kašca, Stefan Ćirković, Miloš Bjelić