

## PODvodNE AKUSTIČNE SENZORSKE MREŽE UNDERWATER ACOUSTIC SENSOR NETWORKS

Dejan Radić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

### Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

**Kratak sadržaj** – U ovom radu, fokusirali smo se na jedinstvene karakteristike akustičnog komunikacionog kanala. Proučavali moguće napade i kontramere komunikacionih protokola u PASM i predloženi SDAM prototip.

**Ključne reči:** PASM, sigurnosni protokoli, SDAM prototip.

**Abstract** – In this paper we have focused on the unique characteristics of the acoustic communication channel, studied possible attacks and countermeasures of communication protocols in UASNs, and proposed SDAM prototype.

**Keywords:** UASNs, secure communication protocols, SDAM prototype.

### 1. UVOD

Tokom proteklih nekoliko godina, došlo je do brzog rasta istraživanja na podvodnim akustičnim senzorskim mrežama (PASM) zbog njihove široke primene u mnogim podvodnim scenarijima, uključujući okeanografsko prikupljanje podataka, asistent navigacije, praćenje zagađenja, istraživanje u blizini obale, prevencija katastrofa i tako dalje.

U većini od gore navedenih aplikacija, PASM su raspoređene bez nadzora, pa čak i u neprijateljskim okruženjima, tako da se mora uzeti u obzir bezbednost komunikacije među senzorskim čvorovima.

Tako u ovom radu, govorimo i o bezbednosnim problemima za PASM.

Podvodne mreže senzora omogućavaju primene čiji su potencijali još nedovoljno istraženi i da poboljšaju našu sposobnost posmatranja i predviđanja velikih vodenih površina. Ključni izazov u dizajniranju proizilazi iz karakteristika podvodnog akustičnog kanala, koji pokazuje veliko slabljenje, visok nivo šuma, odbijanje talasa, veliko i uz to i promenljivo kašnjenje, kao i Doplerov efekat.

Pored toga, izazovi prostiranja u podvodnom okruženju rezultiraju vremenski i prostorno različitim koeficijentima podvodnih kanala, što iziskuje veoma specifičan dizajn protokola.

### NAPOMENA:

Ovaj rad predstavljamo kao master rada čiji mentor je dr Dragana Bajić, red. prof.

### 2. PODvodNE AKUSTIČNE SENZORSKE MREŽE

Akustične komunikacije su tipična tehnologija fizičkog sloja u podvodnim mrežama. U stvari, radio talasi se prostiru na velikim udaljenostima kroz provodljivu slanu vodu samo na vrlo niskim učestanostima (30-300 Hz), što zahteva velike antene i veliku prenosnu snagu.

Optički talasi nemaju tako veliko slabljenje ali zato imaju veliku disperziju.

Osim toga, prenos optičkih signala zahteva visoku preciznost zbog uskih laserskih zraka. Zato se linkovi u podvodnim mrežama obično zasnivaju na akustičnoj bežičnoj komunikaciji.

Tabela 1. Tipični propusni opsezi podvodnih kanala [1].

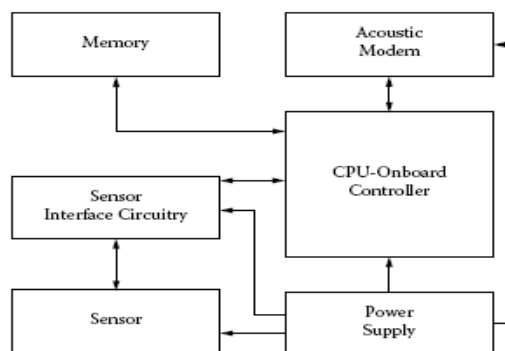
	Domet [km]	Opseg [kHz]
Veoma velik	1000	< 1
Velik	10 do 1000	2 do 5
Srednji	1 do 10	≈ 10
Mali	0.1 do 1	20 do 50
Veoma mali	< 0.1	> 100

Tabela 1 prikazuje propusne opsege podvodnog akustičnog kanala za različite opsege. Akustični linkovi su otprilike klasifikovani kao vertikalni i horizontalni, prema pravcu zvučnog zraka (talasa) u odnosu na morsko dno.

Njihove karakteristike prostiranja se značajno razlikuju, posebno u vezi sa vremenom disperzije, višestrukom putanjom širenja i varijacijom kašnjenja.

#### 2.1. Podvodni senzori

Tipična interna arhitektura podvodnog senzora je prikazana na slici 1.

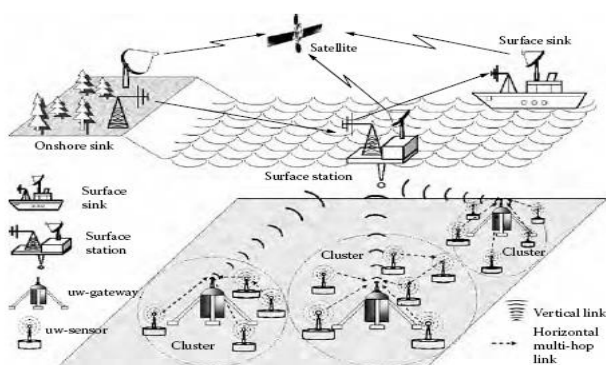


Slika 1. Unutrašnja organizacija podvodnog senzorskog čvora [2]

Sastoji se od glavnog kontrolera/procesora, koji se povezuje sa jednim okeanografskim instrumentom ili senzorom kroz senzorsko kolo. Kontroler prima podatke iz senzora i može da ih sačuva u internu memoriju, procesira i pošalje ih na drugi mrežni uređaj, kontrolišući akustični modem.

## 2.2. Komunikaciona arhitektura

Referentna arhitektura za 2D podvodne mreže je prikazana na slici 2. Grupa senzorskih čvorova je usidrena na dnu okeana. Podvodni senzorski čvorovi su povezani sa jednim ili više podvodnih mrežnih prolaza putem bežičnih akustičnih linkova. Podvodni mrežni prolazi su mrežni uređaji koji su zaduženi za prenos podatka iz mreže sa morskog dna na površinsku stanicu.



Slika 2. 2D podvodne senzorske mreže [2]

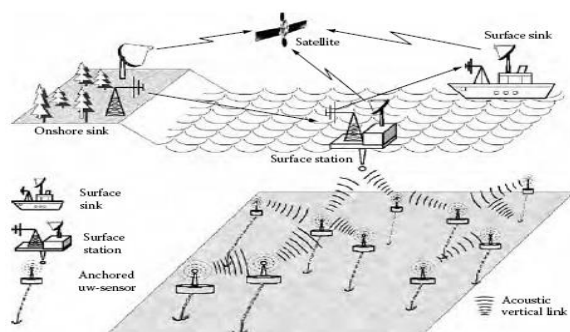
Da bi se to postiglo, opremljeni su sa dva akustična primopredajnika, odnosno vertikalnim i horizontalnim primopredajnikom.

Horizontalni primopredajnik se koristi od strane podvodnih mrežnih prolaza da komunicira sa senzorskim čvorom u cilju:

- slanja komandi i konfiguracijskih podataka do senzora (podvodni mrežni prolaz do senzora) i
- prikuplja podatke monitoringa (senzori do podvodnog mrežnog prolaza).

Vertikalni link se koristi od strane podvodnih mrežnih prolaza da prenese podatke na površinsku stanicu.

Trodimenzionalne podvodne mreže se koriste za otkrivanje i posmatranje pojava koje se ne mogu adekvatno posmatrati pomoću senzorskih čvorova na morskome dnu, tj. za obavljanje kooperativnog uzorkovanja u 3D okeanskom okruženju.



Slika 3. 3D podvodne senzorske mreže [2]

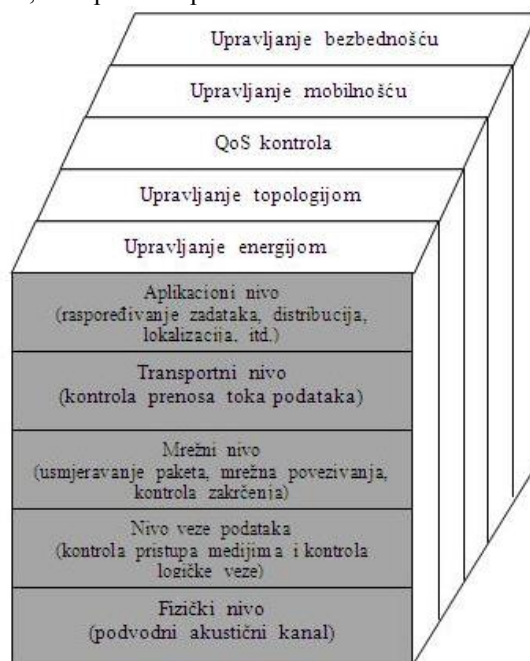
U 3D podvodnim mrežama, senzorski čvorovi plutaju na različitim dubinama. U ovoj arhitekturi, datoj na slici 3, svaki senzor je usidren na morsko dno i opremljen plutajućom bovom koja se može naduvati pumpom. Bova gura senzor na površinu okeana. Dubina senzora reguliše se podešavanjem dužine žice koja povezuje senzor za sidro pomoću elektronski kontrolisanog motora koji se nalazi na senzoru.

## 2.3. Sigurna komunikacija za podvodne senzorske mreže

Akustična komunikacija ima nekoliko loših osobina, kao što je nizak propusni opseg, veliko kašnjenje i veliku verovatnoću greške po bitu. Pored toga, kvalitet veza u akustičnom kanalu je loš, uglavnom zbog višeputnih prostiranja i vremenske varijabilnosti medijuma. Pored gore navedenih tačaka, u PASM, svi senzorski čvorovi slobodno plutaju sa okeanskom strujom, što 3D mrežnu konfiguraciju čini dinamičnom. Stoga velika koncentracija čvorova nije pogodna mrežna struktura.

Pokušaji zlonamernih napada mogu se svrstati u dve grupe: napade na senzorske čvorove i napade na mrežne protokole. Prva vrsta zlonamernog napada je najefikasniji metod da se ošteti PASM. Međutim, ova metoda nije praktična u realnim aplikacijama, pošto, kao što je rečeno, podvodni senzorski čvorovi nisu gusto raspoređeni: teško je da se istovremeno uništi nekoliko čvorova. Daleko si češći napadi na mrežne protokole, posebno na komunikacione protokole. Kada su komunikacioni protokoli razbijeni, cela mreža je beskorisna.

Kao što je prikazano na slici 4, mrežna arhitektura PASM se sastoji od pet nivoa: fizičkog nivoa, nivoa podataka, mrežni, transportni i aplikacioni nivo.



Slika 4. Mrežna arhitektura PASM

Najčešći zlonamerni napad na fizičkom sloju je *jamming* napad, što je popularan tip napada, odbijanja usluge (Denial of Service-DoS) napada. U *jamming* napadu, zlonamerni čvor koji pokušava da prekine komunikaciju

između senzorskih čvorova se naziva jammer. *Jammer* šalje mnogih beskorisnih signala na istom frekvencijskom opsegu. Pošto je frekvencijski opseg akustične komunikacije uzak (od herca do kiloherca), PASM su veoma ranjive na *jamming* napade.

Stoga je u [3] predložen protokol za detekciju podvodnog Jamming-a (UWJDP UnderWater Jamming Detection Protocol) koji otkriva i ublažavan *jamming* napad. Pretpostavlja se da se jamming napad vrši ubacivanjem velikog broja zlonamernih paketa u mrežu. Postoje tri faze u UWJDP, detekcija suseda, *jamming* detekcija i mapiranje *jammed* oblasti.

U fazi *jamming* detekcije, za detekciju se koriste odnosi poslanih i isporučenih paketa (PSR -packet send ratio i PDR - packet delivery ratio) kao i količina utrošene energije (ECA - energy consumption amount). U [4], efekti napada na PASM se proučavaju na osnovu testova u stvarnom okruženju, gde su zlonamerni čvorovi svrstani u dve kategorije: jednostavni (Dummi signal) *jammer* i pametni (obmanljiv) *jammer*.

Prva vrsta jammera ne zna ništa o mreži i koristi šum da ometa akustični komunikacijski kanal.

Druga vrsta jammera zna protokol mreže i može da se pretvara da je legitimni čvor za pokretanje zlonamernih napada. Mrežne performanse pod *jammer* napadom se simuliraju, a rezultati simulacije pokazuju da *jamming* napadi na PASM mogu lako da se pokrenu, što može drastično da degradira performanse mreže.

Rad u [4] daje nova saznanja za istraživače za dalja izučavanja *jamming* napada. Pored već pomenutih zlonamernih šema *jamming*-a tu je i prijateljski *jamming*, koji se može koristiti za poboljšanje bezbednosti mreže.

Na primer, u [5], autori predlažu osiguranu podvodnu komunikacijsku šemu baziranu na kooperativnom prijateljskom *jamming*-u, koji je jamming posredstvom analognog mrežnog kodovanja (Jamming through Analog Network Coding- J-ANC).

Za razliku od konvencionalnih kooperativnih zaštićenih šema od *jamming*-a, koja unose veštački šum kao izvore *jamming*-a, J-ANC upotrebljava isti kod širenja upotrebom legitimnog linka.

Paket prenesen prijateljskim *jammer*-om poznat je legitimnom čvoru, ali ne i prislušivaču. Zbog toga, nakon dobijanja ometanog paketa, legitimni čvor može ispravno dekodovati primljeni paket, dok prislušivač ne može.

#### 2.4. Softverski definisane podvodne akustične mreže

Nedostatak sporazuma standardizacije za PASM nameće dodatne prepreke u dizajnu rekonfigurabilne mreže. Prostorne i vremenske varijacije podvodnih kanala zahtevaju rekonfiguraciju komunikacijskih parametara podvodnih uređaja kako bi obezbedili stabilan rad u smislu verovatnoće bitske greške (*bit error rate* BER) i verovatnoće paketske greške (*packet error rate* PER). Trenutno, komercijalni modemi za adaptaciju adresa, zbog varijacije adresa kanala, koriste unapred definisane načine. Takva rešenja imaju nedostataka:

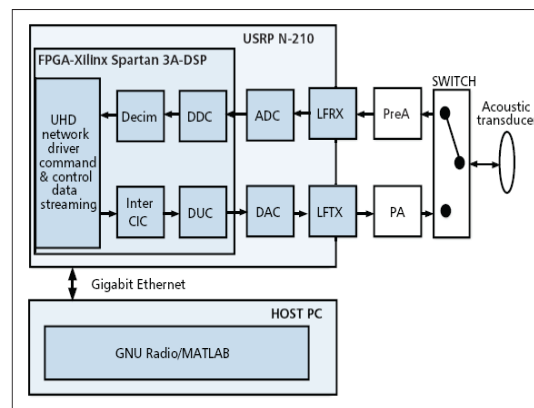
- spособnost da se prebaci u realnom vremenu među konačan broj operativnih modova
- mehanizmi donošenja odluka, da odluči i primeni adaptaciju i

- spособnost da se dinamički prilagođavaju svim mogućim okruženjima zbog konačnog broja operativnih modova.

Shodno tome, postoji potreba za podvodne uređaje koji mogu:

- olakšati raspoređivanje i testiranje novih protokola
- premosti jaz između različitih mrežnih uređaja i protokola za rešavanje problema interoperabilnosti u heterogenim PASM.

U [6] je opisan softverski definisan akustični modem (SDAM) prototip za postojeće podvodne komunikacije, na osnovu komercijalnih dostupnih komponenti.



Slika 5. Hardverska arhitektura predloženog SDAM prototipa [6]

SDAM je kao i njegovo jezgro SDR povezan sa širokopojasnim akustičnim pretvaračem preko pojačala snage /prepojačavača. SDAM iskorišćava jedinstvene sposobnosti i karakteristike SDR da ispuni potrebu za fleksibilnošću lako rekonfigurabilnih UAN uređaja [6].

Predloženi SDAM zasniva se na USRP N210, koji je komercijalno dostupna FPGA- bazirana, SDR platforma. Za rad su odabrane LFTKS i LFRKS *daughterboards* (DC -30 MHz), koji omogućavaju razvoj polu-dupleks primopredajnika koji rade u frekventnom opsegu odabranog omnidirekcionog akustičnog pretvarača, Teledine Reson TC4013, od 1 Hz do 170 kHz.

Kako bi se poboljšao opseg komunikacije SDAM, korišteno je linearno širokopojasno pojačalo snage (PA), Benthovave BII-5002 i predpojačalo napona (PreA), TELEDINE Reson VP2000.

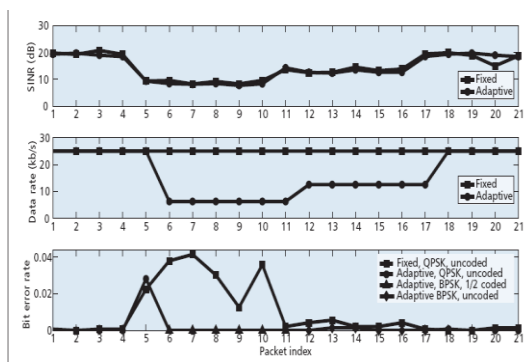
Ugrađen je elektronski prekidač, Mini-Circuits ZKS80-DR230 + da omogući rad jednog akustičnog transduktora kao predajnika i prijemnika u vremenskoj podeli dupleks modu (načinu).

Algoritmi za obradu i protokoli, signala u osnovnom opsegu, uglavnom su implementirani u glavnom računaru (Host PC), koji je povezan sa USRP N210 Gigabitnim Ethernetom (Ethernet) (GigE).

#### 2.5. Eksperimenti

Interesantno je pokazati do kakvih eksperimentalnih rezultata se došlo prilikom testiranja prototipa SDAM. U U [6] su testirali adaptacione mogućnosti u realnom vremenu.

Slika 6 prikazuje eksperimentalnu brzinu prenosa podataka i evaluaciju BER rezultata za fiksne i adaptivne šeme.



Slika 6. Poređenje adaptivne sa fiksnim (ne-adaptivnim) šemama u smislu brzine prenosa podataka i BER za različite SINR profile [6].

Modulaciona šema i kodni količnik menjaju se prema algoritmu čiji je cilj maksimalizacija brzine prenosa podataka za zadati BER: Na slici 6 BER prag je empirijski postavljen na  $10^{-3}$ , dok SINR varira između 10 i 20 dB. U obe, adaptivne i fiksne (ne-adaptivne) šeme, SDAM, emitovanje počinje najvećom mogućom brzinom prenosa podataka. U neadaptivnim šemama brzina ostaje konstantna ali BER prelazi dozvoljeni prag. S druge strane, u adaptivnoj šemi SDAM prilagođava modulaciju i kodni količnik u realnom vremenu sa smanjenjem SINR smanjuje. Konkretno, kada je procenjeni SINR. Kao rezultat, brzina prenosa se podešava na nižu vrednost da se zadovolje unapred definisana BER ograničenja. Naknadno, čim se povećava SINR (od paketa 11 do 17) SDAM menja modulaciju da bi se na kraju vratio na početnu kada SINR dostigne početni nivo od 20 dB.

### 3. ZAKLJUČAK

Zbog velikog vremena propagacije u akustičnim kanalima i zbog pokretljivosti podvodnih čvorova, PASM se mora posmatrati kao mreža otporna na kašnjenje. Bezbedni

komunikacioni protokoli se dizajniraju na osnovu interakcije između senzorskih čvorova kojom se otkrivaju zlonamerni čvorovi i time osigurava integritet osetljivih podataka, njihov ispravan prijem, a takođe i privatnost i poverljivost.

### 4. LITERATURA

- [1] M. Stojanovic. Acoustic (Underwater) Communications. In ed. J. G. Proakis, *Encyclopedia of Telecommunications*. John Wiley and Sons, New York, (2003).
- [2] D. Codiga, J. Rice, and P. Baxley. Networked Acoustic Modems for Real-Time Data Delivery from Distributed Subsurface Instruments in the Coastal Ocean: Initial System Development and Performance, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 21(2), 331–346, (2004).
- [3] S. Misra *et al.*, “Jamming in Underwater Sensor Networks: Detection and Mitigation,” *IET Commun.*, vol. 6, no. 14, Sep. 2012, pp. 2178–88.
- [4] M. Zuba *et al.*, “Vulnerabilities of Underwater Acoustic Networks to Denial-of-Service Jamming Attacks,” *Security Commun. Net.*, Feb. 2012, pp. 1–11.
- [5] H. Kulhandjian, T. Melodia, and D. Koutsonikolas, “Securing Underwater Acoustic Communications through Analog Network Coding,” *Proc. SECON*, June 2014, pp. 1–9.
- [6] E. Demirors *et al.*, “Design of a Software-Defined Underwater Acoustic Modem with Real-Time Physical Layer Adaptation Capabilities,” *Proc. Int’l. Conf. Underwater Networks & Systems*, ser. WUWNET ‘14, 2014, pp. 25:1–25:8.

### Kratka biografija:

**Dejan Radić** rođen je u Ljuboviji 1981. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva odbranio je 2018.god.

kontakt: [dejane81@gmail.com](mailto:dejane81@gmail.com)