

Podvodni modem

Milomir Stefanović (1999)

IV razred, Prva kragujevačka gimnazija, Kragujevac

062 641 570

milomirstefanovic9@gmail.com

Nevena Vasilevska (2000)

III razred, V beogradska gimnazija, Beograd

064 66 22 343

vasilevska.nevena@gmail.com

Apstrakt

Srpski

Cilj ovog rada jeste evaluacija podvodnog akustičnog modema. Implementiran sistem se sastoji od 2 modema koji imaju ulogu prijemnika i predajnika. Predajnik se sastoji od predpojačavača i tranzjusera, a prijemnik od tranzjusera i postpojačavača. Za prenošenje signala kroz medijum je neophodna modulacija pomenutog signala. U ovom radu vršene su 3 različite vrste modulacije: FSK, PSK i ASK. Pored tipa modulacije varirano je i vreme trajanja jednog bita i to u periodima od 25ms, 20ms, 15ms, 10ms, 5ms i 1ms. Rezultati su pokazali da je najmanja greška postignuta korišćenjem ASK modulacije, dok je najlošija tačnost dobijena korišćenjem PSK modulacije. Najveća frekvencija kojom je uspešno poslata poruka je 100Hz, a uz algoritam za korekciju bitova najveća frekvencija je 200Hz.

English

This paper evaluates an underwater modem. Underwater wireless technology that is used is acoustic transmission. Acoustic waves are chosen because radio propagation is strongly affected by water conductivity, and optical communication has severe constraints like requiring precise positioning and clear water that would decrease scattering of light beams.

The component that enables signal transmission is transducer, an electromagnetic element that converts electrical energy to mechanical and vice versa. Transducer used in this paper is omni-directional radially expanding ring made from piezoelectric ceramics. Transducer is encapsulated in a potting compound made from urethane to prevent contact with any conductive fluids. Main outline of this paper's method is given in Picture 2. The message being sent is modulated to enable transmitting the signal at the frequency that corresponds to the transducer's resonance frequency. The power of signal generated after modulation is too low to allow effective transmitting so preamplifier is connected to the transducer input. After

transmitting the signal in the medium, it's being detected by another transducer. Post-amplifier is connected to the output of this transducer to prepare signal for demodulation. After the demodulation is complete, bits of sent and received messages are correlated.

Different modulation types and symbol periods are compared.

Modulations used are Frequency Shift Keying, Amplitude Shift Keying and Phase Shift Keying. Symbol duration is varied between 25ms, 20ms, 15ms, 10ms, 5ms i 1ms. Results have shown that PSK performed worst, which is due to difficulties in phase tracking and ASK performed best, which is in opposition with our hypothesis. This is explained with water in our tank not having any turbulence. In real life conditions it's expected that FSK will outperform ASK. Longer symbol periods cause every modulation type to perform with 100% accuracy. It is concluded that optimal modulation is FSK with bit duration of 10ms, in case no bit correction algorithms are deployed, and 5ms with said algorithms. Further research should measure and analyze modem performance in more realistic conditions.

Uvod

Podvodna bežična komunikacija, zbog jedinstvenih osobina vodenog kanala, predstavlja novi izazov u poređenju sa komunikacijom žicama ili bežičnom komunikacijom kroz atmosferu. Problem nastaje jer radio talasi u vodi drastično slabe, a svetlost ima tendenciju da se rasipa. Najvažnija oblast primene bežične podvodne komunikacije su bežične senzorske mreže. Predviđa se da će podvodne senzorske mreže naći primenu u prikupljanju okeografskih podataka, praćenju zagađenja, navigacionim svrhama, kao i za međusobnu komunikaciju autonomnih podvodnih vozila. Za ovakve primene neophodno je razvijanje pouzdanog ali ujedno i energetski efikasnog načina podvodne komunikacije.

Podvodna radio komunikacija

Jedna od mogućnosti za komunikaciju pod vodom su radio talasi. Radio talasi su elektromagnetni talasi čija je frekvencija ispod 300GHz. Podvodne radio komunikacije su istraživane od samih početaka razvijanja radija, ali njihova primena je izostala[10,11]. Glavni problem u koriscenju radio talasa je provodljivost vode koja ometa širenje elektromagnetnih talasa. Provodljivost vode predstavlja problem jer elektromagnetni talasi koji se šire kontinualno prenose energiju između električnog i magnetnog polja. Takođe, radio signal u vodi slabi eksponencijalno sa udaljenošću od odašiljaca. Kao rezultat toga se javljaju poteškoće uspostavljanja komunikacije u višim frekvencijskim domenima na udaljenostima preko 10 metara u okeanu. Slabljenje signala je direktno proporcionalno frekvenciji nosećeg signala, te se može smatrati dovoljno malim u slučaju niskih frekvencija (do 30 kHz)[2]. Ipak, komunikacija na ovim frekvencijama zahteva prevelike antene i preskupe komunikacijske sisteme.

Optička podvodna komunikacija

Prostiranje svetlosti kroz vodu se značajno razlikuje od prostiranja zvuka. Objašnjenje ovoga leži u fenomenu koji se naziva plazma frekvencija. Vrednost ove frekvencije određuje opseg

frekvencija u kojima se medijum, u ovom slučaju voda, ponasa kao dielektrik[2]. Ovo omogućava postizanje većeg dometa u odnosu na radio signale. Glavni problem optičke komunikacije je neophodnost preciznog pozicioniranja prijemnika na pravcu odašiljanja svetlosnog signala i neophodnost bistre vode[2]. Iz ovih razloga nije proizveden ni jedan komercijalni svetlosni podvodni modem, ali istraživači se još uvek bave ovim problemom[9]. Takođe, ovde značajan problem stvaraju i ostale karakteristike svetlosti kao talasa a to su refleksija, aprosbcija, prelamanje svetlosti itd.[2] što dodatno ograničava mogućnost pravljenja ovakvog modema.

Akustična podvodna komunikacija

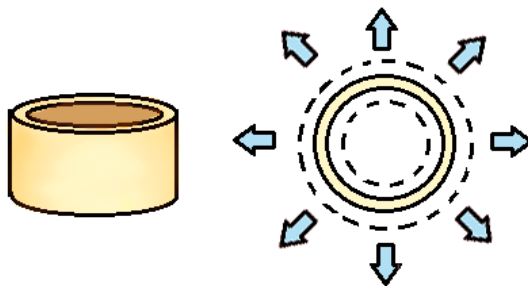
U podvodnom kanalu se informacije najčešće odašilju u obliku zvučnih talasa. Zvučni talasi su uzrokovani varijacijama pritiska u medijumu. Brzina zvuka je srazmerna gustini sredine kroz koju se prostire i u vodi iznosi u proseku 1500m/s [3], što je oko 5 redova veličine manje od brzine prostiranja elektromagnetnih talasa. Glavna prednost zvučnih u odnosu na elektromagnetne talase je relativno malo slabljenje zvuka u vodi. Najveći gubitci nastaju usled apsorpcije i širenja, zatim šuma medijuma kroz koji se prostire i pojavom refleksije[2,5], ali za razliku od prethodno opisanih tehnologija, većina ovih problema je prevaziđena[7], tako da se, trenutno, najveći broj komercijalnih podvodnih komunikatora služi ultrazvukom.

Tranzjuser

Tranzjuser je elektromagnetni uređaj koji vrši konverziju električne energije u mehaničku energiju i obrnuto. Pizoelektrični tranzjuser je posebno pogodan za generisanje i prijem zvučnih signala pod vodom. Sposobnost prijema i odašiljanja zvučnih signala omogućuje pizoelektrični efekat koji predstavlja tendenciju odgovarajućih materijala da menjaju svoju dužinu u zavisnosti od polarnosti i jačine električnog polja, kao i da postaju polarizovani kada su izloženi mehaničkim uticajima.

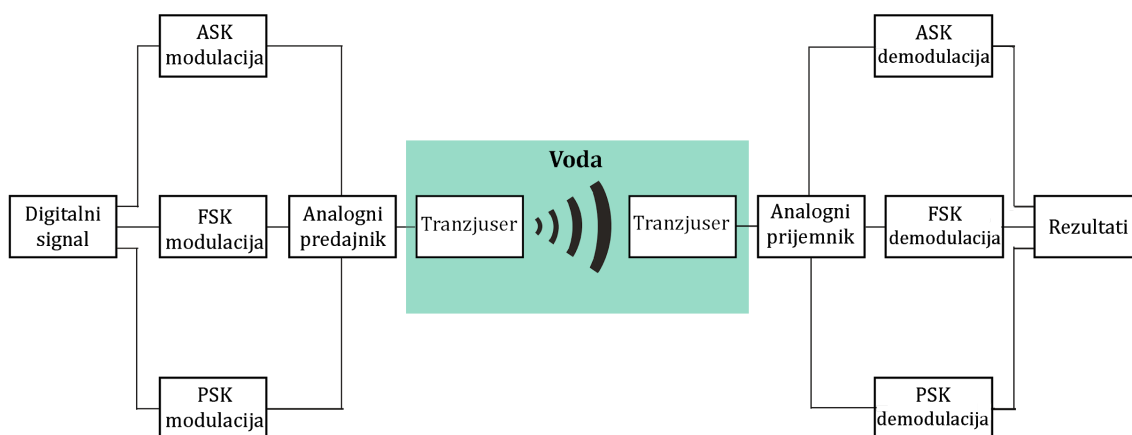
Oblik i pravac polarizacije pizoelektričnog elementa određuju pravac odašiljanja zvučnih signala, kao i elektromehaničke osobine keramičkog elementa od kojih su neke rezonantna frekvencija, kapacitivnost, napon koji generiše pod mehaničkim uticajem i pomeraj prilikom izloženosti električnom polju [1]. Zbog smanjivanja moguće refleksije o površinu vode i dno, za podvodne komunikacije se uglavnom koriste komponente koje su monopolne u horizontalnom planu [1]. Jedna od ovakvih komponenti je i prsten koji se radijalno širi, što daje 2D monopolnost u ravni normalnoj na osu prstena.

Posebna pažnja se poklanja i osiguravanju da pizoelektrična keramika ne dođe u kontakt sa provodljivim tečnositma. To se postiže izlivanjem vodonepropusne kapsule oko tranzjusera. Za izlivanje su pogodni poliuretani koji su akustički transparentni u odnosu na medijum u kom će se koristiti [1].



Slika 1: Prikaz izgleda pizoelektričnog tranzjusera i načina njegovog širenja pod uticajem električnog polja

Figure 1: Appearance of the transducer and its radial spreading



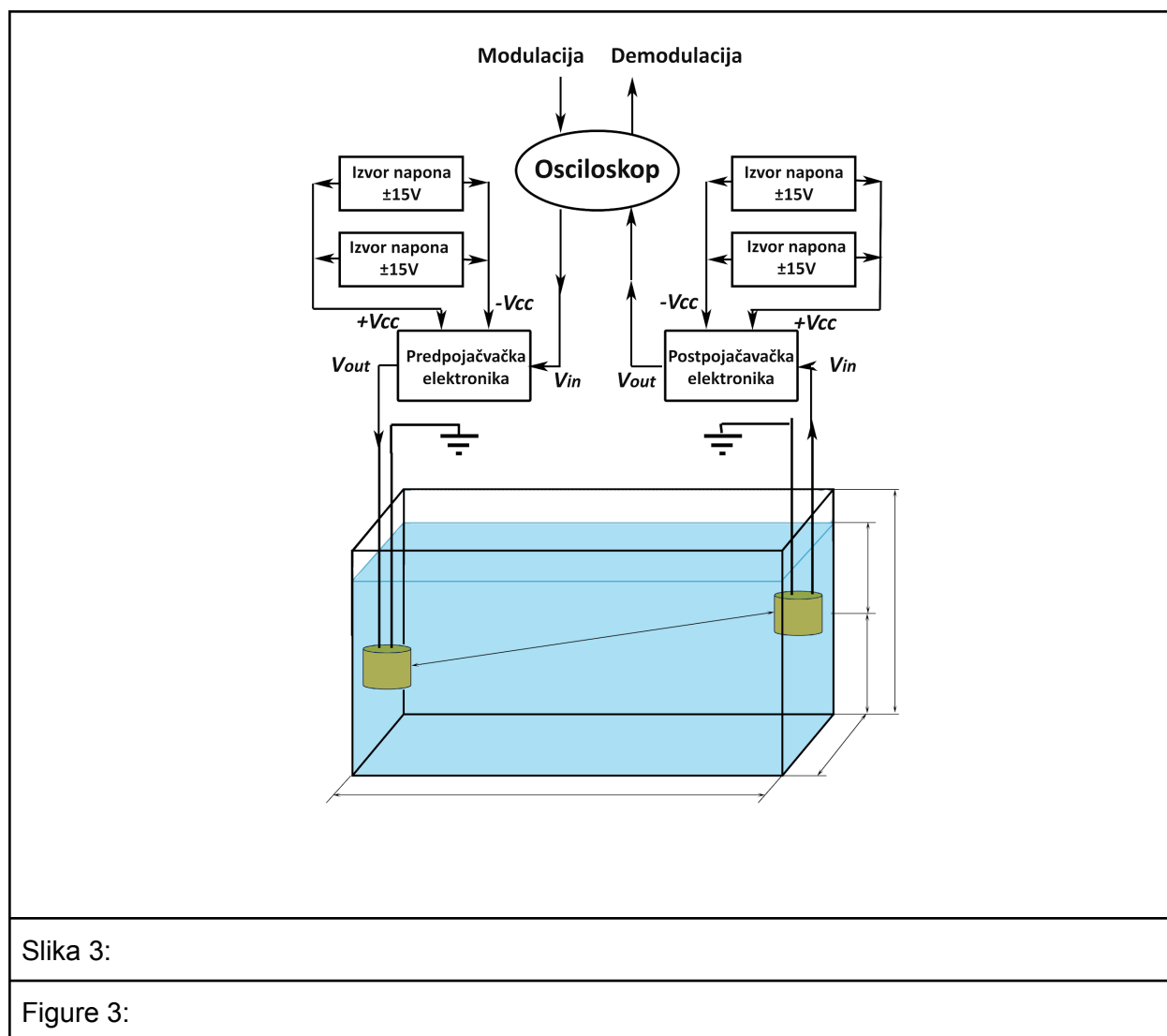
Slika 2: Grafički prikaz rada podvodnih modema

Figure 2: Graphical abstract

Metod

U ovom radu implementiran je akustični podvodni modem po šemi sa slike 2. Tranzjuseri su postavljeni u plastičnu posudu i povezani sa elektronikom i izvorima kao na slici 3. Korišćeni su tranzjuseri . Poruka koja je predviđena za slanje je predstavljena u obliku niza bitova korišćenjem UTF-8 transformacione šeme. Izabrana je poruka „PFE “. Kako bi tranzjuser preneo informaciju kroz medijum, prvo je potrebno izvršiti jednu od 3 izabrane modulacije (FSK, PSK i ASK) nakon kojih je generisan signal pogodan za slanje kroz medijum. Međutim, taj signal je male snage pa ga je potrebno pojačati i to se radi predpojačavačem, povezanim na

tranzjuser u okviru predajnika. Kada dođe do prostiranja zvuka u medijumu, detektuje ga tranzjuser u okviru prijemnika i konvertuje ovaj signal u analogni električni signal koji postpojačavačka elektronika sprema za demodulaciju. Nakon što signali prođu kroz demodulator, upoređivanjem odgovarajućih bitova je određivano da li je primljena poruka identična poslatoj.



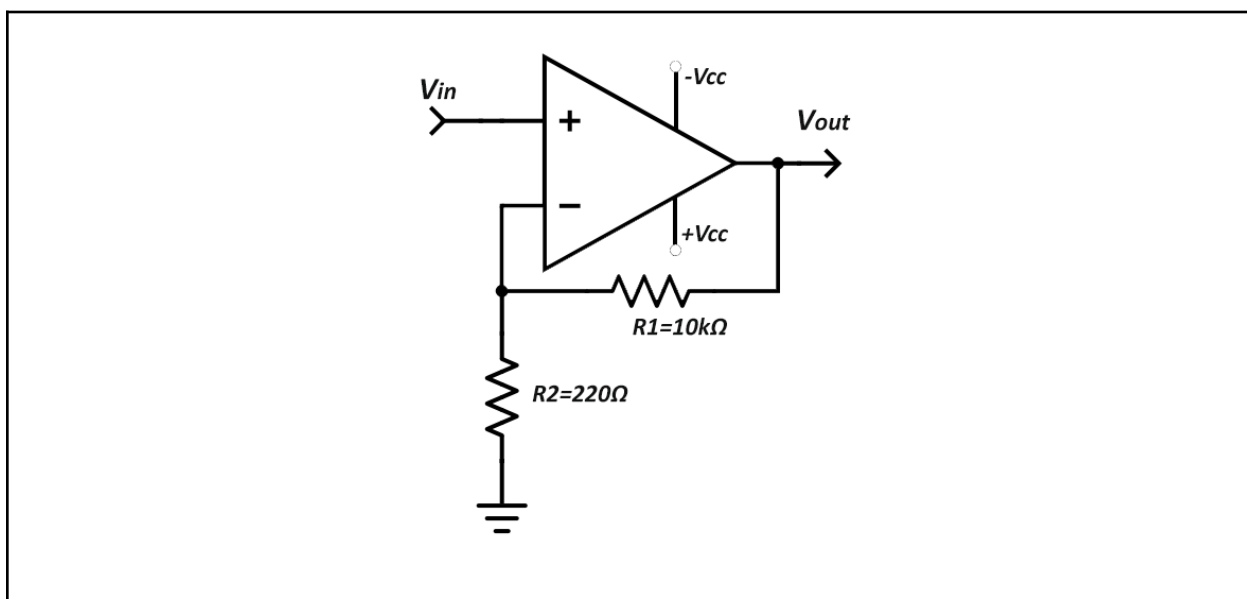
Hardverska implementacija modema

Kako bi bila omogućena komunikacija na bazi tranzjuser - tranzjuser potrebno je napraviti predpojačavačku i postpojačavačku elektroniku. Zadatak predpojačavačke elektronike jeste da poveća napon ulaznog signala koji će za posledicu imati pojačanje ultrazvuka koji tranzjuser odašilje. Nasuprot tome, zadatak postpojačavačke elektronike jeste da pojača primljeni signal,

ali i da izvrši njegovo filtriranje i dalju obradu kako bi signal bio spreman za kompjutersku obradu.

Predpojačavačka elektronika

Kao što je prethodno navedeno, zadatak predpojačavačke elektronike jeste da poveća snagu ulaznog signala, tj snagu ultrazvuka. U ovom radu pojačanje snage ultrazvuka implementirano je pojačanjem napona ulaznog signala čime se srazmerno menja i snaga zvuka. Ovaj predpojačavač implementiran je kao jednostavan neinvertujući pojačavač kao na slici. Korišćen je integrisan operacioni pojačavac TL082CP, koji je napajan simetričnim napajanjem od $\pm 30V$.



Slika 3: Šema predpojačavača

Figure 3: Preamplifier scheme

Jednačina pojačanja ovog pojačavača data je kao:

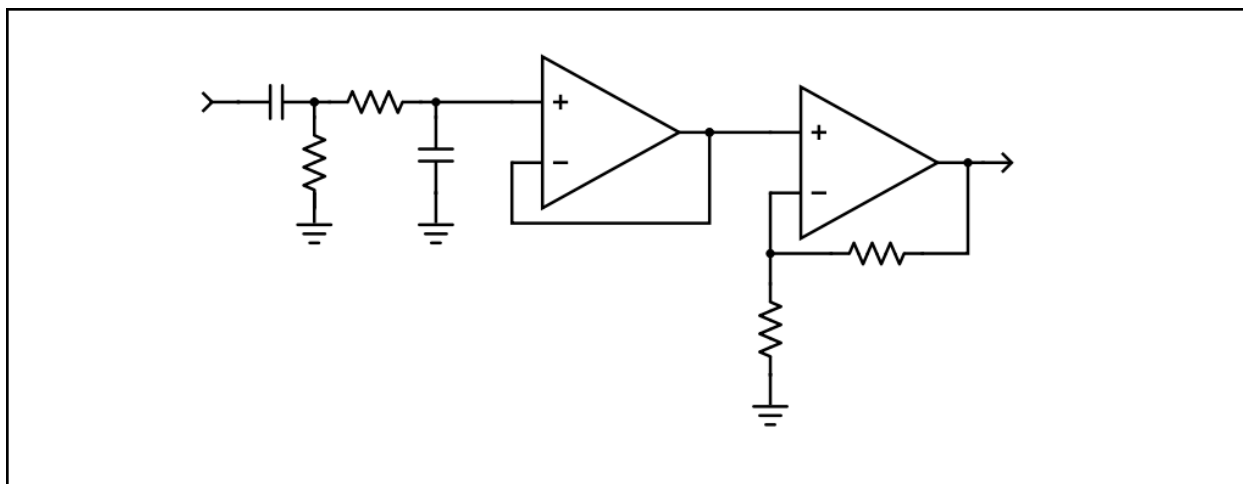
$V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$	(1)
---	-----

U ovom radu dovođen je napon od 1V (V_{in}) pri maksimalnom dozvoljnom protoku struje i on je pojačavan 20 puta, i na taj način dobijan je ulazni signal (V_{out}). Maksimalni dozvoljeni protok struje postoji zbog postojanja dielektrika i poluprovodnika koji rade samo do dozvoljene granične vrednosti struje pri kojoj ne bi došlo do proboja dielektrika ili do gubljenja

poluprovodničkih karakteristika korišćenih poluprovodničkih elemenata. Na opisani način maksimizovana je ulazna snaga ultrazvuka.

Postpojačavačka elektronika

Nakon puta koji zvuk prelazi kroz vodu, on dolazi do tranzjusera u okviru prijemnika. Primljeni signal je oslabljen, fazno pomeren i zašumljen u odnosu na poslati signal. Ovakav fenomen je potpuno očekivan s' obzirom na razloge opisane u 1.3. Iz navedenih razloga, nakon prijema signala se najpre primenjuje *bandpass* filter između 30kHz i 40kHz. Na ovaj način odbacuju se niske frekvencije koje su posledice kako šuma tako i harmonika osnovnih frekvencija signala, a takođe izbacuju se i frekvencije veće od 40kHz koje nisu od interesa u ovom slučaju. Nakon filtriranja sledi jedinični pojačavač. Zadatak jediničnog pojačavača jeste da teorijski stvori beskonačni otpor na svom izlazu tako da impedansa RC filtera kao i tranzjusera ne utiče na podešavanje pojačavača koji sledi. Pojačavač koji se primenjuje posle jediničnog pojačavača je neinvertujući operacioni pojačavač, koji je, kao i pojačavač u predpojačavaču, jednostavan neinvertujući, osim što je u ovom slučaju pojačan 1000 puta jer je ulazni signal u neinvertujući pojačavač reda veličine 1mV. Šema celog postpojačavača prikazana je na sledećoj slici:



Slika 4: Šema postpojačavača

Figure 4: Postamplifier scheme

Na ovaj način signal je spreman za dalju digitalnu obradu, tj. prolazak kroz demodulator čime dobijamo krajnje rešenje problema.

Modulator i demodulator

Za potrebe fizičkog odašiljanja se vrši modulacija signala, tj. u kontinualnom, periodičnom signalu se varira jedna ili više karakteristika modulacijskim signalom koji je nosilac informacije.

Implementirana su tri osnovna oblika digitalne modulacije koji variraju frekvenciju (FSK - *Frequency Shift Keying*), amplitudu (ASK - *Amplitude Shift Keying*) ili fazu (PSK - *Phase Shift Keying*) nosećeg signala. U svakoj od navedenih modulacija, frekvencija odabiranja je bila 384 kHz. Pre demodulacije, signal je sniman na osciloskopu sa fekvencijom odabiranja od // ____kHz

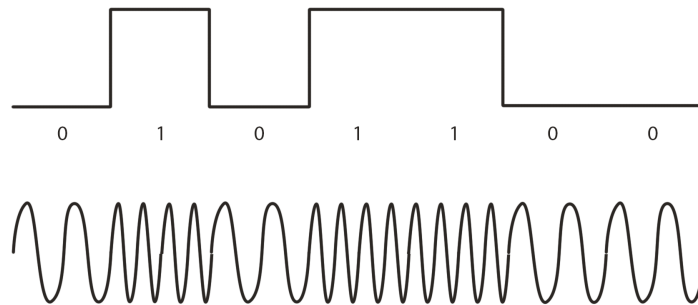
FSK

FSK modulacija je jedna od najranijih digitalnih vrsta modulacije. Ona koristi diskretne vrednosti modulacijskog signala za utiskivanje informacija u pormenama frekvencije signala nosioca. Frekvencija nosioca se menja između 38,6 kHz (f_1) i 39,4 kHz (f_2), što može biti predstavljeno jednačinama:

$e_{2FSK}(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_1 t) & \text{kada se šalje "1"} \\ A \cos(2\pi f_2 t) & \text{kada se šalje "0"} \end{cases}$	2)
--	----

Signal nakon FSK modulacije se može predstaviti kao zbir dva signala različitih frekvencija, što nas dovodi do formule kojom možemo predstaviti digitalni signal nakon FSK modulacije:

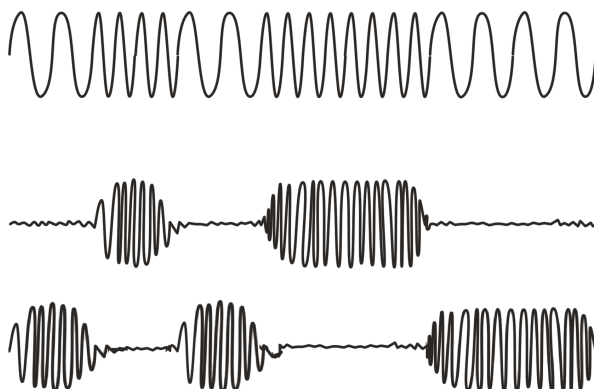
$\begin{aligned} v_{FSK}(t) &= \cos \omega_1 t \cdot v_d(t) + \cos \omega_2 t \cdot (1 - v_d(t)) = \\ &= \frac{1}{2} \cos \omega_1 t + \frac{1}{\pi} [\cos(\omega_1 - \omega_0)t + \cos(\omega_1 + \omega_0)t] - \\ &\quad - \frac{1}{3\pi} [\cos(\omega_1 - 3\omega_0)t + \cos(\omega_1 + 3\omega_0)t] + \dots + \\ &\quad + \frac{1}{2} \cos \omega_2 t + \frac{1}{\pi} [\cos(\omega_2 - \omega_0)t + \cos(\omega_2 + \omega_0)t] - \\ &\quad - \frac{1}{3\pi} [\cos(\omega_2 - 3\omega_0)t + \cos(\omega_2 + 3\omega_0)t] + \dots + \end{aligned}$	3)
---	----



Slika 5: Prikaz informacijskog i FSK modulisanog signala

Figure 5: Information signal and FSK modulated signal

Demodulator ovog signala ima sposobnost da razlikuje dve frekvencije što se u slučaju koherentne detekcije može postići upoređivanjem proizvoda primljenog signala sa dva različita talasa čije frekvencije odgovaraju frekvencijama kojima se predstavljau bitovi originalnog informacijskog signala. Razlike u dobijenim signalima su predstavljene na slici



Slika 6: Signal tokom FSK demodulacije

Figure 6: Signal changes during FSK demodulation

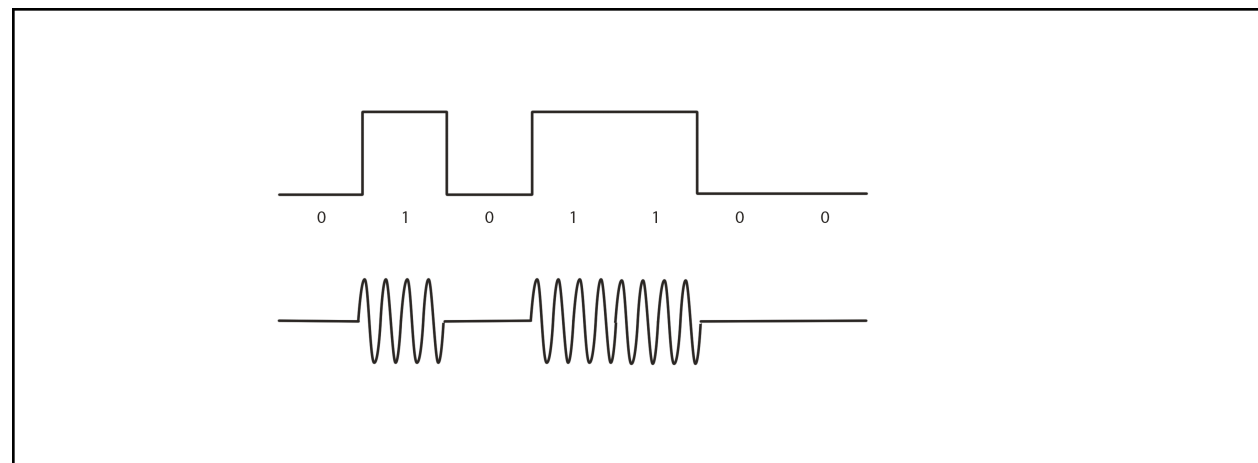
ASK

ASK modulacija je najjednostavniji tip digitalne modulacije. Informacije se kod ovog tipa modulaicije prenose promenom amplitude signala nosioca, pri kojem su frekvencija i faza konstantne. Bitovi se predstavljaju različitim amplitudama talasa. Kako šum u medijumu utiče u najvećem broju slučajeva samo na amplitudu, ASK modulisan signal je izuzetno podložan šumu. Iz tog razloga je glavna primena ASK modulacije prenošenje digitalnih podataka kroz optička vlakna.

$e_{2ASK}(t) = \begin{cases} A_1 \cos(2\pi f_c t) & \text{kada se šalje "1"} \\ A_0 \cos(2\pi f_c t) & \text{kada se šalje "0"} \end{cases}$	4)
--	----

Signal dobijen ASK modulacijom predstavlja proizvod nosećeg i digitalnog signala. Jednačina ovakvog signala je data u jednačini.

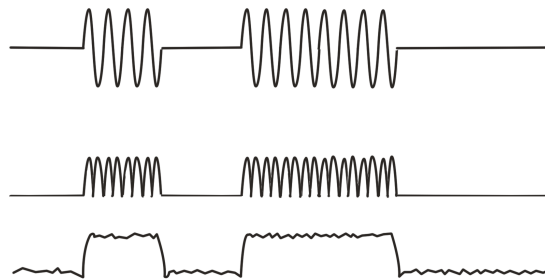
$\begin{aligned} v_{ASK}(t) &= v_c(t) \cdot v_d(t) = \\ &= \frac{1}{2} \cos \omega_c t + \frac{1}{\pi} [\cos(\omega_c - \omega_0)t + \cos(\omega_c + \omega_0)t] - \\ &- \frac{1}{3\pi} [\cos(\omega_c - 3\omega_0)t + \cos(\omega_c + 3\omega_0)t] + \dots \end{aligned}$	5)
--	----



Slika 7: Informacijski signal i ASK modulisan signal

Figure 7: Information signal and ASK modulated signal

ASK demodulator je kao i modulacija veoma jednostavan. Najpre je generisana apsolutna vrednost signala, a zatim je na novodobijeni signal primenjen *lowpass* filter. Ovime je dobijen signal u kojem je lako detektovati prvobitnu informaciju.



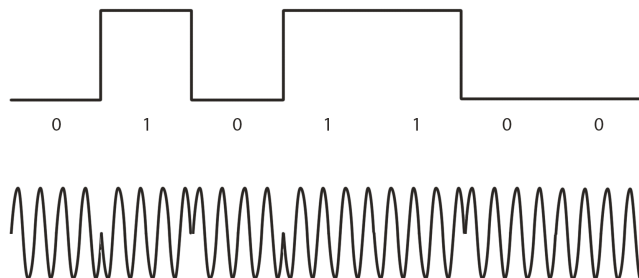
Slika 8: Signal tokom ASK demodulacije

Figure 8: Signal changes during ASK demodulation

PSK

Ovaj tip modulacije menja fazu nosećeg signala u zavisnosti od vrednosti informacijskog signala. Amplituda i frekvencija su konstantne tokom menjanja faze. Kao što se može videti iz jednačine, modulacija binarnom PSK je ekvivalentna korišćenju suprotnih signala za različite vrednosti bitova.

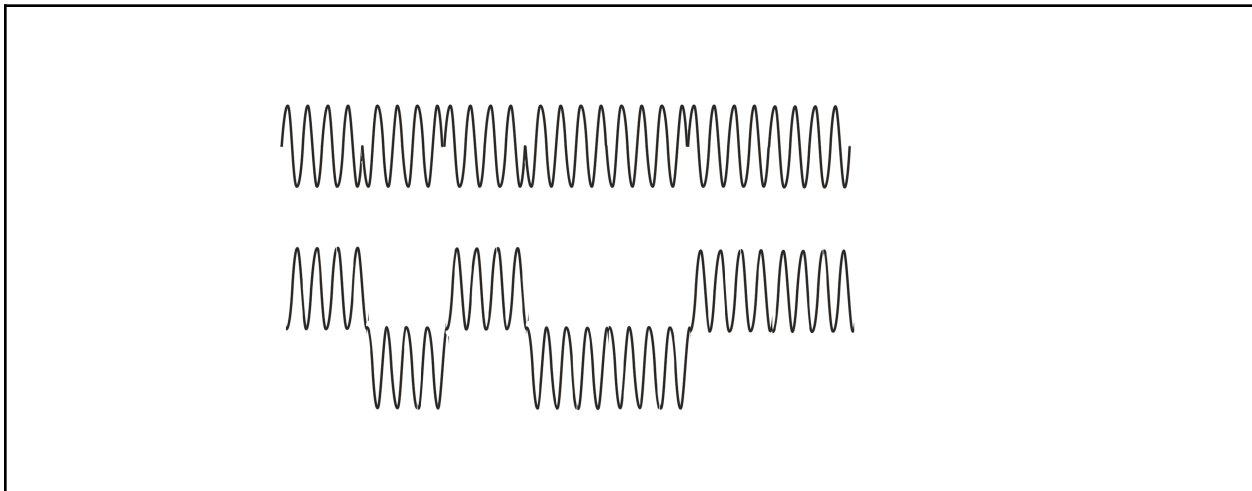
$e_{2PSK}(t) = \begin{cases} A\cos(2\pi f_c t) & \text{kada se šalje "1"} \\ A\cos(2\pi f_c t + \pi) = -A\cos(2\pi f_c t) & \text{kada se šalje "0"} \end{cases}$	6)
---	----



Slika 9: Informacijski signal i PSK modulisan signal

Figure 9: Information signal and PSK modulated signal

Demodulator PSK modulacije koristi činjenicu da su signali suprotni. Množenjem signala sa dvostrukim nosećim signalom je postignuto razdvajanje bitova iznad i ispod nule. Daljom primenom *lowpass* filtera vrši se izdvajanje informacijskog signala, kao što se može videti na slici 10.



Slika 10: Signal tokom PSK demodulacije

Figure 10: Signal changes during PSK demodulation

Eksperiment

Tranzjuseri su potopljeni u vodu na najvećem rastojanju koje dozvoljava posuda. Odgovarajući elektronski uređaji su povezani sa tranzjuserima, a zatim je citav sistem povezan na izvore napajanja. Napajanje su obezbeđivala dva redno vezana izvora napona po tranzjuseru. Kao izvori napajanja su korišćeni _____. Zbog sprečavanja prisluškivanja poslatog signala na prijemniku, napajanja prijemnika i predajnika su fizički odvojena. Informacijski signal je modulisan i sa osciloskopa _____ prosleđen predpojačavačkoj elektronici.

Nakon akvizicije signala na prijemniku i snimanja na osciloskopu, vršena je obrada i demodulacija, čiji je rezultat niz od 32 bita. Poruka koja je slata bila je "PFE_" koja takođe je 32bitna poruka. Varirani su tip modulacije i period jednog bita. U ovom radu korišćeni su periodi od 20ms, 15ms, 10ms, 5ms i 1ms. Za svaki period mereno je da li je bit tačan u zavisnosti od vrste modulacije i trajanja jednog bita.

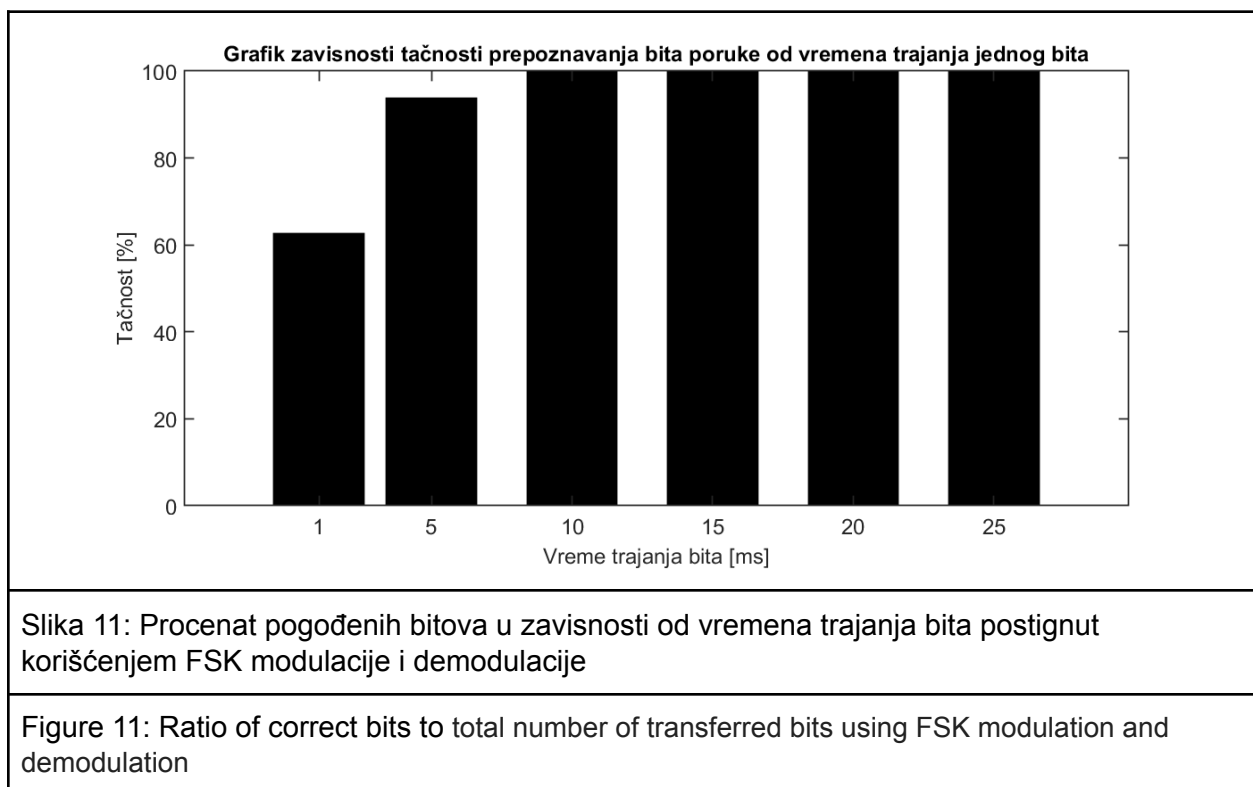
Hipoteze

Na osnovu gore opisanog, izvode se sledeće hipoteze: Prva hipoteza je da se najlošiji rezultati očekuju od PSK modulacije, jer je zbog samih karakteristika modema i fenomena promene faze kroz vodu komunikacija znatno otežana. Druga hipoteza je da će se FSK modulacijom dobiti najtačniji rezultat, zbog veće otpornosti na šum u odnosu na ASK i detekcije koja nema potrebu za praćenjem faze. Takođe ako se jedan bit prenosi duže vremena, nezavisno od metoda, rezultati će biti bolji, što predstavlja treću hipotezu.

Rezultati

FSK

Koristivši FSK modulaciju i demodulaciju i računavaši tačnost prepoznavanja svakog bita dobijen je sledeći grafik:

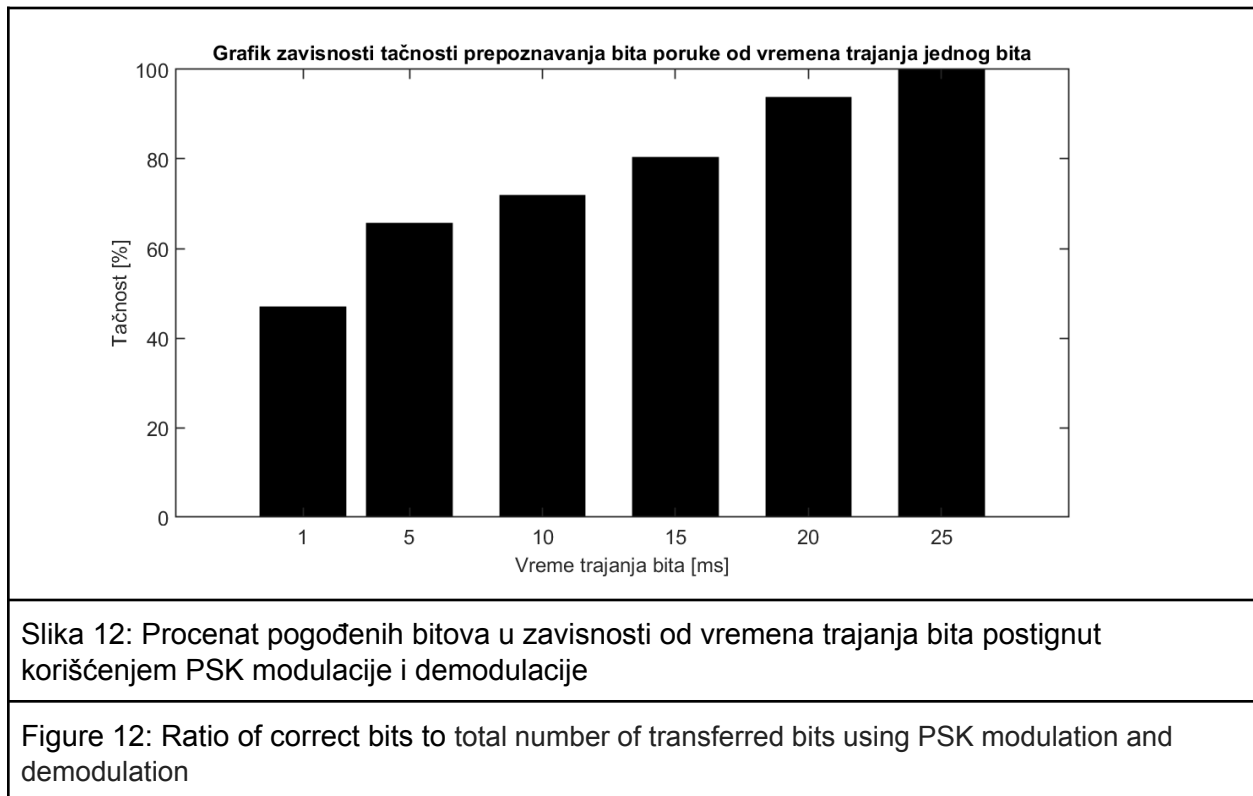


Na ovom grafiku može se primetiti da je tačnost prepoznavanja bitova 100% za periode od 10ms, 15ms, 20ms i 25ms, dok je za 5ms tačnost nešto više od 90%. Za 1ms, tačnost je tek nešto više od 60% iz čega možemo zaključiti da je apsolutno nemoguće vršiti komunikaciju na toj frekvenciji. Na osnovu dobijenih rezultata zaključuje se da je najveća moguća frekvencija na

kojoj može da se vrši komunikacija bez dodatnog implementiranja algoritma za korekciju bitova 100Hz (kada je period 10ms), a uz pomenuti algoritam 200Hz (kada je period 5ms).

PSK

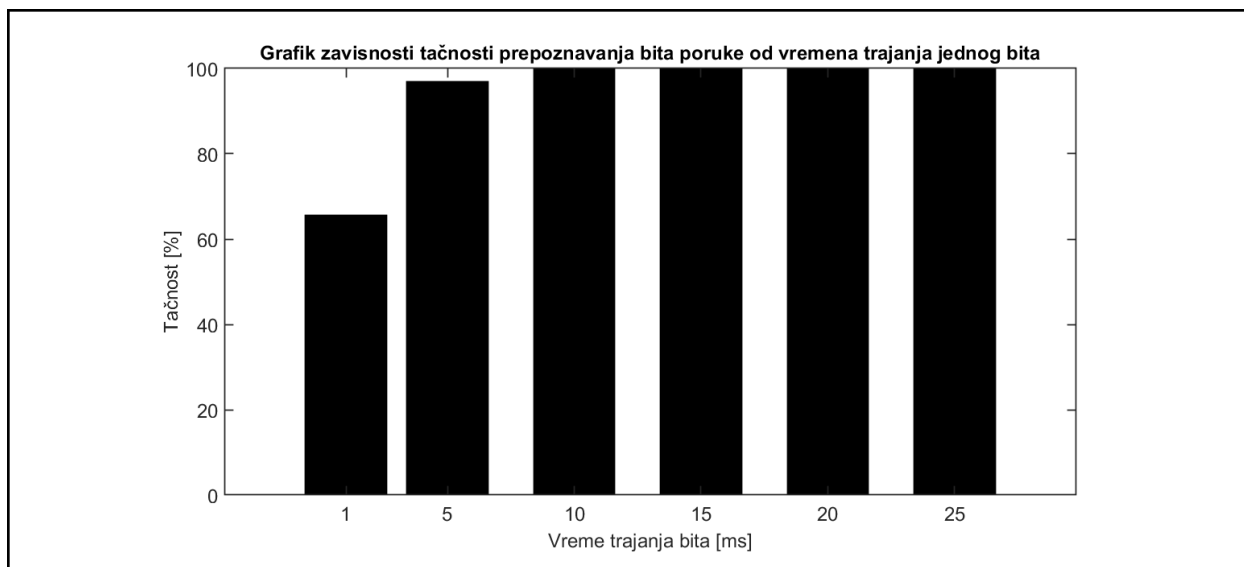
Koristivši PSK modulaciju i demodulaciju i računanjem tačnosti prepoznavanja svakog bita dobijen je sledeći grafik:



Na ovom grafiku može se primetiti da je tačnost prepoznavanja bitova 100% za periode od 10ms, 15ms, 20ms i 25ms, dok je za 5ms tačnost nešto više od 90%. Za 200kHz, tačnost je tek nešto više od 60% iz čega možemo zaključiti da se pouzdana komunikacija ne može vršiti na toj frekvenciji.

ASK

Koristivši ASK modulaciju i demodulaciju i računavaši tačnost prepoznavanja svakog bita dobijen je sledeći grafik:



Slika 13: Procenat pogođenih bitova u zavisnosti od vremena trajanja bita postignut korišćenjem ASK modulacije i demodulacije

Figure 13: Ratio of correct bits to total number of transferred bits using ASK modulation and demodulation

Na ovom grafiku može se primetiti da je tačnost prepoznavanja bitova 100% za periode od 10ms, 15ms, 20ms i 25ms, dok je za 5ms tačnost skoro 100%. Za 1ms, tačnost je tek nešto više od 60%, što je nagli pad u odnosu na 5ms i iz čega možemo zaključiti da je nepraktično vršiti komunikaciju na toj frekvenciji. Na osnovu dobijenih rezultata zaključuje se da je najveća moguća frekvencija na kojoj može da se vrši komunikacija bez dodatnog implementiranja algoritma za korekciju bitova 100Hz a uz opisani algoritam 200Hz.

Diskusija i zaključak

Na osnovu dobijenih rezultata, zaključuje se da, u najboljem slučaju, ispitivan podvodni modem može komunicirati na frekvenciji od 100Hz bez implementacije algoritma za korekciju bita, dok je dobijena maksimalna frekvenija uz implementaciju ovog algoritma 200Hz, što se slaže sa referentnim radom. Za razliku od referentnog rada [1], najbolja tačnost prepoznavanja bitova primećena je kod ASK moduliranih signala, a ne kod FSK kao što je u referentnom radu, što je suprotno od naše hipoteze. Naime, pretpostavka je da je razlog tome to što su snimci rađeni na mirnoj površini, jako male zapremine i konstantnog saliniteta u kojoj vrednost amplitude iste frekvencije bivaju zaista konstantne, što definitivno ne bi bio slučaj da voda nije mirna. Kao što je i pretpostavljeno u drugoj hipotezi PSK algoritam daje zaista najlošije rezultate, koji mogu biti objašnjeni faznim kasnjenjem sistema, koje otežava ovakvu demodulaciju. Takođe što je brža komunikacija, to će biti teže da se prati promena faze te je opravdano ovaj metod pokazao najlošije rezultate. Takođe na osnovu grafika se jasno vidi da je komunikacija uspešnija ako je

trajanje bita duže. Na osnovu svega pomenutog potvrđene su 2 od 3 hipoteze, i dalje istraživanj treba usmeriti ka merenju i analiziraju merenja u slučaju u kom voda nije mirna i zapremina je veća, jer je pretpostavljeno da će u tom slučaju FSK modulacija pokazati bolje rezultate od ASK modulacije.

Dalje softversko unapređivanje projekta treba posmatrati u implementaciji algoritma za korekciju bitova kako bi sa sigurnošću tvrdili koja je maksimalna frekvencija na kojoj je moguće vršiti komunikaciju u ovakvim sistemima.

Dalje hardversko unapređivanje projekta treba posmatrati u kvalitetnijoj postpojačavačkoj elektronici, prvenstveno u projektovanju mnogo preciznijeg filtera koji bi jasnije odvajao noseće frekvencije i koji bi dosta olakšao demodulaciju i uspešnije prepoznavanja bitova.

Literatura

[1] Bridget Benson. Design of a Low-cost Underwater Acoustic Modem for Short-Range Sensor Networks, *University of California, San Diego*, 2010

[2] C. M. G. Gussen, P. S .R. Diniz, M. L. R Campos, W. A. Martins, F. M. Costa and J. N. Gois, A Survey of Underwater Wireless Communication Technologies *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 31, no.1, 2016

[3] F. B. Jensen, W. A. Kuperman et al., Computational Ocean Acoustics, 2nd ed., *ser. Modern Acoustics and Signal Processing. Springer Publishers*, 2011.

[4] L. Liu, S. Zhou and J.-H. Cui, Prospects and problems of wireless communication for underwater sensor networks, *Wireless Communications and Mobile Computing*, pp. 977-994, 2008.

[5] G.M. Wenz, Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources, *Journal of the Acoustical Society of America*, 34, 19361956, 1962.

[6] M. Stojanovic, Underwater Acoustic Communications, Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, *John G. Webster, Ed., John Wiley & Sons*, vol.22, pp.688-698. 1999.

[7] D. B. Kilfoyle and A. B. Baggeroer, The state of the art in underwater acoustic telemetry, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 25, no. 1, pp. 427, Jan 2000.

[8] J. Wills, W. Ye, and J. Heidemann, Low-power acoustic modem for dense underwater sensor

[9] J. Simpson, A 1 Mbps Underwater Communication System using LEDs and Photodiodes with Signal Processing Capability, North Carolina State University,

Masters Thesis, 2007.

[10] M. Siegel and R. W. P. King, Electromagnetic propagation between antennas submerged in the ocean, IEEE Trans. Antennas Propagation, vol. 4, pp. 507- 513, 1973.

[11] M. Rhodes, Electromagnetic Propagation in Sea Water and its value in Military Systems, Second Annual Conference of Systems Engineering for Autonomous Systems, July 2007.