



**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

Aleksa Albijanić

**Simulaciona analiza efikasnosti MAC
protokola zasnovanih na mašinskom učenju u
podvodnim akustičnim senzorskim mrežama**

-MASTER RAD-

Podgorica, 2024.

Ime i prezime autora: Alekса Albijanić, BSc

ETIČKA IZJAVA

U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 18 Pravila studiranja na master studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je master rad pod naslovom

"Simulaciona analiza efikasnosti MAC protokola zasnovanih na mašinskom učenju u podvodnim akustičnim senzorskim mrežama"

moje originalno djelo.

Podnositelj izjave,

Alekса Albijanić, BSc



U Podgorici, dana 14.10.2024. godine

INFORMACIJE O MAGISTRANTU

Ime i prezime: Aleksa Albijanić
Datum i mjesto rođenja: 13.08.1998. Podgorica, Crna Gora.
Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina diplomiranja: Elektronika, Telekomunikacije i Računari, 2020.

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU

Naziv master studijskog programa: Telekomunikacije
Naslov rada: Simulaciona analiza efikasnosti MAC protokola zasnovanih na mašinskom učenju u podvodnim akustičnim senzorskim mrežama
Fakultet: Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore

OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: 12.12.2023.
Datum sjednice Vijeća Univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema: 08.02.2024.
Komisija za ocjenu/odbranu master rada Prof. dr Igor Radusinović
Prof. dr Enis Kočan
Doc. dr Slavica Tomović
Mentor: Doc. dr Slavica Tomović
Datum odbrane: 18.11.2024.

Sažetak

Predmet ove teze je simulaciona analiza MAC (*Medium Access Control*) protokola zasnovanih na mašinskom učenju i njihove efikasnosti u podvodnim akustičnim senzorskim mrežama. Podvodni akustični kanal predstavlja jedinstvene izazove, kao što su veliko propagaciono kašnjenje, ograničen propusni opseg i velika potrošnja energije, što čini tradicionalne MAC protokole, koji se koriste u terestričkim mrežama, neefikasnim. Da bi se odgovorilo na ove izazove, ova teza istražuje primjenu tehnika mašinskog učenja u optimizaciji raspodjele resursa, smanjenju kolizija i poboljšanju ukupne efikasnosti mreže.

Istraživanje koristi detaljne simulacije za procjenu performansi različitih MAC protokola zasnovanih na mašinskom učenju pri različitim pristupima modeliranju kanala. Analiziran je uticaj ključnih faktora, kao što su veličina mreže, gustina i karakteristike propagacije akustičnog signala, na efikasnost protokola. Rezultati ukazuju da MAC protokoli koji koriste mašinsko učenje performansama nadmašuju tradicionalna rješenja u segmentima iskorišćenosti kanala i energetske efikasnosti.

Ključne riječi: Podvodne akustične senzorske mreže – MAC protokoli – Pojačano učenje

Abstract

The subject of this thesis is the simulation analysis of machine learning-driven Medium Access Control (MAC) protocols and their efficiency in Underwater Acoustic Sensor Networks (UASNs). The underwater acoustic channel presents unique challenges, such as high propagation delay, limited bandwidth, and high energy consumption, which render traditional MAC protocols used in terrestrial networks ineffective. To address these challenges, this thesis investigates the application of machine learning techniques in optimizing resource allocation, reducing collisions, and improving overall network efficiency.

The research employs detailed simulations to evaluate the performance of various machine learning-based MAC protocols under different channel modeling approaches. The impact of key factors, such as network size, density, and acoustic signal propagation characteristics, on protocol efficiency is examined. The simulation results demonstrate that MAC protocols incorporating machine learning techniques outperform traditional solutions in terms of channel utilization and energy efficiency.

Keywords: Underwater acoustic sensor networks – MAC protocols - Reinforcement learning

Sadržaj

| | |
|---|-----------|
| Rezime | ii |
| Abstract | ii |
| Spisak slika | 1 |
| Uvod | 3 |
| 1 Pregled dosadašnjih istraživanja | 4 |
| 1.1 MAC protokoli zasnovani na takmičenju za pristup kanalu | 5 |
| 1.2 MAC protokoli bez takmičenja za pristup kanalu | 7 |
| 1.3 Hibridni MAC protokoli | 8 |
| 1.4 Primjena mašinskog učenja u dizajnu MAC protokola | 9 |
| 1.5 Simulaciona okruženja | 11 |
| 2 Pojačano učenje | 12 |
| 2.1 Uvod | 12 |
| 2.2 Markovljev proces odlučivanja | 13 |
| 2.3 Q-učenje | 15 |
| 2.3.1 Ažuriranje Q-vrijednosti i strategije istraživanja | 16 |
| 2.3.2 Karakteristike Q-učenja | 18 |
| 2.4 <i>Multi-armed bandits</i> problem | 18 |
| 2.5 Multi-agentni sistemi | 19 |
| 3 Podvodni akustični kanal | 21 |
| 3.1 Izazovi komunikacije u podvodnom akustičnom kanalu | 22 |
| 3.1.1 Doplerov efekat | 23 |
| 3.1.2 Prostorno-vremenska neizvjesnost | 25 |
| 3.1.3 Zavisnost brzine propagacije od spoljašnjih faktora | 26 |

| | | |
|----------------------|---|-----------|
| 3.1.4 | <i>Multipath</i> propagacija | 27 |
| 3.1.5 | Slabljenje i šum | 28 |
| 3.2 | Modelovanje podvodnog akustičnog kanala | 32 |
| 3.2.1 | Fizički kanal u DESERT simulatoru | 32 |
| 3.2.2 | HMM model kanala u DESERT simulatoru | 33 |
| 4 | UW-ALOHA-Q | 39 |
| 4.1 | ALOHA-Q | 39 |
| 4.2 | UW-ALOHA-Q | 42 |
| 4.2.1 | Azinhronost | 43 |
| 4.2.2 | Smanjenje broja slotova | 43 |
| 4.2.3 | Random Backoff | 44 |
| 4.3 | Implementacija UW-ALOHA-Q protokola u DESERT simulatoru . . | 46 |
| 4.3.1 | Agenti | 46 |
| 4.3.2 | Površinski prijemnik | 49 |
| 5 | Predložene modifikacije UW-ALOHA-Q protokola | 50 |
| 5.1 | UW-ALOHA-Q sa modifikovanom <i>backoff</i> strategijom | 50 |
| 5.2 | UW-ALOHA-Q sa jednim kanalom i sinhronizacijom | 52 |
| 5.3 | Sinhronizovani <i>sub-slotted</i> UW-ALOHA-Q | 54 |
| 6 | Analiza performansi | 57 |
| 6.1 | Model sistema | 58 |
| 6.2 | Rezultati simulacija | 60 |
| 6.2.1 | Poređenje UW-ALOHA-Q sa TDMA i ALOHA-CS protokolima | 61 |
| 6.2.2 | Anliza performansi UW-ALOHA-Q-SC i UW-ALOHA-Q-SS protokola | 64 |
| 6.2.3 | Energetska efikasnost | 70 |
| Zaključak | | 74 |
| Bibliografija | | 75 |

Spisak slika

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Grafički prikaz interakcije agenta sa okruženjem. | 14 |
| 3.1 | Moguće brzine i dometi propagacije pod vodom za različite tehnologije [1]. | 23 |
| 3.2 | Fenomen prostorno-vremenske neizvjesnosti. | 25 |
| 3.3 | Koeficijent apsorpcije u podvodnom akustičnom kanalu kao funkcija frekvencije [2]. | 29 |
| 3.4 | Sferično i cilindrično prostiranje. | 29 |
| 3.5 | Odnos signal/šum u funkciji frekvencije za definisana propagaciona rastojanja. | 31 |
| 4.1 | Struktura slota ALOHA-Q protokola. | 40 |
| 4.2 | Princip funkcionisanja UW-ALOHA-Q protokola. | 45 |
| 4.3 | Logika implementirana u agentima UW-ALOHA-Q protokola. | 47 |
| 4.4 | Princip komunikacije fizičkog nivoa i nivoa linka pri prijemu/slanju paketa. | 48 |
| 5.1 | Struktura frejma sinhronizovanog UW-ALOHA-Q protokola. | 53 |
| 5.2 | Struktura ACK paketa kod sinhronizovanog UW-ALOHA-Q protokola. | 54 |
| 5.3 | Struktura frejma sub-slotted sinhronizovanog UW-ALOHA-Q protokola. | 55 |
| 6.1 | Topologija mreže | 58 |
| 6.2 | Iskorišćenost kanala kao funkcija broja mrežnih čvorova - <i>range-based</i> BER model. | 62 |
| 6.3 | Iskorišćenost kanala kao funkcija broja mrežnih čvorova - HMM BER model. | 63 |
| 6.4 | Iskorišćenost kanala kroz vrijeme - različiti <i>backoff</i> mehanizmi. | 64 |

| | |
|---|----|
| 6.5 Iskorišćenost kanala u funkciji broja čvorova mreže pri <i>range-based</i> modelu kanala, za različita maksimalna rastojanja od <i>sink</i> čvora: a) 500m, b) 1000m, c) 1500m. | 66 |
| 6.6 Iskorišćenost kanala u funkciji broja čvorova mreže pri HMM modelu kanala, za različita maksimalna rastojanja od <i>sink</i> čvora: a) 500m, b) 1000m, c) 1500m. | 68 |
| 6.7 Uticaj parametra γ na iskorišćenost kanala za mrežu sa 10, 15, 20 podvodnih čvorova. | 69 |
| 6.8 Uticaj broja sub-slotova na performanse UW-ALOHA-Q-SS protokola pri različitim vrijednostima parametra γ | 70 |
| 6.9 Potrošnja energije analiziranih protokola. | 71 |
| 6.10 Poređenje iskorišćenosti kanala i energetske potrošnje za analizirane protokole. | 72 |

Uvod

Podvodne akustične senzorske mreže (*Underwater Acoustic Sensor Networks – UASNs*) nalaze primjenu u različitim oblastima kao što su podvodna istraživanja, navigacija autonomnih vozila, detekcija mina, zaštita obale i dr. Ove mreže sastoje se od autonomnih senzorskih čvorova raspoređenih pod vodom, koji su sposobni da prikupljaju podatke iz okruženja i komuniciraju međusobno putem akustičnih signala. Prikupljeni podaci se zatim prenose prema nadređenom čvoru ili gejtviju povezanom sa zemaljskom mrežom, gdje se podaci dalje obrađuju i koriste za različite svrhe. Uslijed jedinstvenih karakteristika akustične propagacije u vodi, razvoj efikasnih komunikacionih protokola za ovo okruženje predstavlja veliki izazov.

Akustični talasi nisu jedini način bežične komunikacije pod vodom, ali su jedini koji omogućava prenos informacije na veće udaljenosti. Istovremeno, podvodni akustični kanal je opšte prepoznat kao jedan od najtežih komunikacionih medijuma u upotrebi danas. Akustična propagacija je najbolje podržana na niskim frekvencijama, a propusni opseg koji je dostupan za komunikaciju je veoma uzak. Uprkos izuzetno uskom propusnom opsegu, sistem pokazuje svojstvo širokopojasnosti zbog veoma niske centralne učestnosti. Zvuk se propagira pod vodom veoma malo brzinom od oko 1500 m/s, a propagacija se dešava preko više putanja. Rasipanje kašnjenja (*delay spread*) reda nekoliko desetina ili čak stotina milisekundi rezultira frekvencijski-selektivnom distorzijom signala, dok kretanje uzrokuje izražen Doplerov efekat. Najlošija svojstva radio-kanala - loš kvalitet veze mobilnog zemaljskog radio-kanala i veliko kašnjenje satelitskog kanala - kombinovana su u podvodnom akustičnom kanalu.

S obzirom na to da su u UASN mrežama propagaciona kašnjenja obično značajno veća od kašnjenja prenosa paketa, komunikacioni protokoli dizajnirani za kopnene mreže ne mogu se efikasno primijeniti u UASN mrežama. Na primjer, protokoli kao što su TDMA (*Time Division Multiple Access*), CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) i ALOHA pokazuju veoma loše performanse u ovom okruženju.

TDMA protokoli zahtijevaju preciznu sinhronizaciju vremena među čvorovima kako bi se izbjeglo preklapanje vremenskih slotova dodijeljenih različitim čvorovima. Međutim, postizanje i održavanje tako precizne sinhronizacije je izuzetno teško u podvodnim akustičnim mrežama zbog velikih i promjenljivih propagacionih kašnjenja. Čak i male greške u sinhronizaciji mogu dovesti do značajnog preklapanja slotova i kolizija paketa. Osim toga, da bi se izbjegle kolizije, trajanje vremenskih slotova se mora dimenzionisati tako da obuhvata ne samo vrijeme prenosa paketa, već i maksimalno propagaciono kašnjenje između čvorova. To dovodi do vrlo niske iskorijšenosti kanala, jer se većina vremena u slotu troši na čekanje umjesto na sam prenos korisnih podataka.

CSMA protokoli se oslanjaju na mehanizam osluškivanja kanala (*carrier sensing*) prije slanja paketa, kako bi se izbjeglo istovremeno slanje od strane višestrukih čvorova. Čvor odlaže slanje dok ne detektuje da je kanal slobodan. Međutim, zbog sporije propagacije zvuka pod vodom, informacija o zauzeću kanala stiže sa značajnim zakašnjnjem. Kao rezultat toga, čvorovi mogu pogrešno detektovati slobodan kanal i započeti slanje istovremeno, što dovodi do kolizije paketa na prijemnoj strani. Ovaj problem je posebno izražen u gušćim mrežama i pri većem saobraćajnom opterećenju. ALOHA dozvoljava čvorovima da šalju podatke bez prethodne koordinacije, ali broj kolizija raste sa porastom broja čvorova i saobraćajnog opterećenja, dodatno smanjujući efikasnost mreže.

Zbog ovih izazova, potrebna su prilagođena rješenja za UASN mreže koja uzimaju u obzir specifična ograničenja podvodne akustične komunikacije, kao što su velika kašnjenja, mali propusni opseg kanala, energetska ograničenja i promjenljivi uslovi okruženja. Nedavna istraživanja su pokazala da je pojačano mašinsko učenje (*Reinforcement Learning - RL*) obećavajuća tehnika za dizajniranje MAC (*Medium Access Control*) protokola za UASN mreže [3]. Ovi protokoli tretiraju senzorske čvorove kao RL agente, omogućavajući im da kroz interakciju sa svojim okruženjem nauče efikasne strategije prenosa u dinamičkom okruženju. Poruke potvrde od primaoca služe kao ključni signal za učenje, omogućavajući finu adaptaciju strategija prenosa. Takođe, RL-bazirani pristupi imaju značajno niži komunikacioni *overhead*, zahvaljujući mogućnosti distribuirane implementacije. Međutim, dosadašnje analize ovih rješenja su oslonjene na idealizovane simulacione modele, koji zanemaruju kompleksnost stvarnih akustičnih propagacionih uslova pod vodom. Ovi modeli često prepostavljaju konstantne brzine propagacije i zanemaruju stohastičke greške u prenosu. Takvi pojednostavljeni uslovi mogu generisati netačne ili zavaravajuće

pokazatelje o efikasnosti i pouzdanosti RL-baziranih MAC protokola, posebno jer se strategije učenja mogu poremetiti zbog nemogućnosti jasnog razlučivanja uzroka neuspješnog prenosa paketa. Na primjer, izostanak poruke potvrde može biti povezan sa lošom odlukom MAC protokola, ali isto tako može biti rezultat loših uslova na komunikacionom kanalu i greške u prenosu senzorskih podataka ili čak same poruke potvrde. Ovi problemi komplikuju proces konvergencije RL algoritama, ugrožavajući tako stabilnost i efikasnost MAC protokola.

Predmet istraživanja ovog rada je evaluacija MAC protokola koji koriste tehnike pojačanog mašinskog učenja (RL) za optimizaciju komunikacije u podvodnim akustičnim senzorskim mrežama (UASN). Osnovni cilj je uporediti RL-bazirane protokole sa tradicionalnim rješenjima koja ne koriste mašinsko učenje, kako bi se jasno identifikovale prednosti i mane oba pristupa. Pored toga, na osnovu identifikovanih nedostataka postojećeg RL-baziranog rješenja, predložene su i njegove modifikacije u cilju poboljšanja efikasnosti. U radu su objašnjene implementacije predloženih i relevantnih protokola iz literature u DESERT simulacionom okruženju [4] koje realistično modeluje podvodni akustični kanal. Upotreba realističnih simulacionih modela je od velike važnosti uzimajući u obzir visoke troškove i logističke izazove eksperimentalnog testiranja u stvarnim podvodnim okruženjima.

Kao ključni indikatori za evaluaciju performansi analizirani su iskorišćenost kanala i potrošnja energije. Analizom je obuhvaćen širok spektar scenarija i mrežnih topologija kako bi se dobila sveobuhvatna slika efikasnosti i primjenjivosti postojećih i predloženih rješenja. Različiti scenariji su uključivali različite veličine mreže i nivoje kvaliteta komunikacionog kanala, čime se omogućila detaljna procjena robusnosti i skalabilnosti razmatranih protokola.

Rad je organizovan na sledeći način. Prva glava sumira dosadašnja istraživanja i dostignuća iz oblasti podvodnih komunikacija. Druga glava sadrži opis algoritama mašinskog učenja na koje se oslanja dizajn novih protokola predloženih u ovom radu. Treća glava opisuje karakteristike podvodnog akustičnog kanala i način njegovog modelovanja u DESERT simulatoru. Četvrta glava daje pregled UW-ALOHA-Q [5] MAC protokola za UASN mreže, čije su modifikacije predmet ovog rada. Peta glava opisuje predložene izmjene postojećih protokola u cilju poboljšanja određenih indikatora performansi, kao i detalje njihove implementacije u DESERT simulatoru. Šesta glava prezentuje rezultate simulacija, uključujući opis korišćenih mrežnih topologija i razmatranih scenarija. U zaključku su diskutovani rezultati, sumirani glavni doprinosi rada i naznačeni mogući pravci budućih istraživanja.

Glava 1

Pregled dosadašnjih istraživanja

Zahvaljujući raznovrsnosti njihove primjene, UASN mreže u poslednje vrijeme postale su atraktivan predmet istraživanja. Mogu se koristiti za prikupljanje okeanografskih podataka, praćenje nivoa zagađenja, detekciju mina i prirodnih nepogoda [6]. Pored toga, razvoj sofisticiranih podvodnih robotskih sistema (*Autonomous Underwater Vehicles - AUVs / Remotely Operated Vehicles - ROVs*) u kombinaciji sa senzorskim mrežama otvorio je nove mogućnosti za istraživanje nepristupačnih djelova mora i okeana. U [7], opisani su primjeri misija autonomnih vozila za monitoring bioloških parametara okeana i nadzor naftnih cjevovoda. AUV-ovi opremljeni senzorima mogu mjeriti širok spektar parametara od interesa, kao što su količina svjetlosti, zamućenost vode, salinitet, temperatura i dubina, čijom se obradom mogu izvesti zaključci od naučnog značaja. Razvoj ovakvih sistema ima važne implikacije ne samo za naučna istraživanja, već i za olakšavanje svakodnevnih pomorskih aktivnosti. Primjer upotrebe AUV-a za nadzor naftnih cjevovoda dat je u [8]. Predloženi pristup značajno smanjuje potrebu za angažovanjem ronilaca i njihovo izlaganje riziku, istovremeno olakšavajući proces nadgledanja i istraživanja podmorskih objekata. Međutim, efikasna realizacija istraživačkih misija koje uključuju više AUV-ova i senzorskih uređaja zahtijeva pouzdanu komunikaciju i koordinaciju između ovih komponenti. To otvara novi spektar primjena za podvodne akustične senzorske mreže, koje mogu služiti za navigaciju, lokalizaciju i komunikaciju između podvodnih vozila, što je ključno za uspjeh kompleksnih misija u podvodnim uslovima.

Za podvodne komunikacije na većim rastojanjima dominantno se koriste akustični talasi, kao što je objašnjeno u [9]. Optički i elektromagneti talasi mnogo su podložniji efektu apsorpcije pod vodom i zbog toga su potpuno neupotrebljivi na rastojanjima većim od desetak metara [10]. Brzina prostiranja zvuka pod vodom

iznosi oko 1500 m/s [11], što uzrokuje značajna kašnjenja u prenosu, povlačeći niz nepovoljnih efekata i otežavajućih faktora koji negativno utiču na podvodnu akustičnu komunikaciju. Uz potrebu za sinhronizacijom i energetskom efikasnošću, u dizajnu komunikacionih protokola najveći izazovi se javljaju na sloju linka (MAC podsloju), koji je odgovoran za regulisanje pristupa kanalu [12].

Prema najopštijoj klasifikaciji, MAC protokoli se dijele na dvije glavne kategorije: protokole zasnovane na takmičenju za pristup kanalu (*contention-based*) i protokole bez takmičenja za pristup kanalu (*contention-free*). Protokoli iz prve kategorije omogućavaju čvorovima da se takmiče za pristup kanalu, što može dovesti do kolizija, dok protokoli iz druge kategorije organizuju pristup kanalu na način koji eliminiše kolizije putem rezervisanih resursa ili sinhronizacije. U nastavku ovog poglavlja, dat je pregled ključnih protokola iz obje kategorije, uključujući njihove osnovne principe rada, prednosti i nedostatke u kontekstu podvodnih akustičnih mreža. Pored toga, razmatrana su i hibridna rješenja koja kombinuju elemente oba pristupa kako bi se postigao optimalan balans između efikasnosti i pouzdanosti prenosa podataka. U nastavku, obrađena su najnovija istraživanja vezana za MAC protokole bazirane na mašinskom učenju, uz poseban osvrt na njihove performanse i izazove povezane sa trenutnim simulacionim analizama. Na kraju poglavlja, diskutovana je vjerodostojnost simulacionih okruženja u kojima su protokoli upoređivani.

1.1 MAC protokoli zasnovani na takmičenju za pristup kanalu

Među najznačajnijim protokolima zasnovanim na takmičenju su ALOHA i njene brojne varijante, koje su detaljno opisane u radovima [13] i [14]. Autori rada [15] ističu da običan ALOHA protokol (*pure ALOHA*) pokazuje bolje performanse od slotted-ALOHA protokola u podvodnom okruženju zbog prostorno-vremenske neizvjesnosti [16]. Da bi se prevazišao ovaj problem, predloženi su PDT-ALOHA (*Propagation Delay Tolerant ALOHA*) [15] i DTMAC (*Delay Tolerant MAC*) [17] protokoli. PDT-ALOHA je prilagođena verzija klasičnog ALOHA protokola, dizajnirana kako bi se prevazišao problem velikog propagacionog kašnjenja, pa je izuzetno koristan u satelitskim i podvodnim akustičnim mrežama. Povećanjem dužine slota, uz regulaciju pristupa kanalu baziranom na vjerovatnoćama, protokol smanjuje broj kolizija i povećava propusnost. Sa druge strane, DTMAC smanjuje broj kolizija u mreži korišćenjem *carrier sensing* tehnike. Radi uštede energije, čvorovi u DTMAC

protokolu često ulaze u režim spavanja kada ne prenose ili ne primaju podatke. Ova funkcija je posebno važna za podvodne senzore koji imaju ograničene energetske resurse. Međutim, u oba slučaja riječ je o protokolima baziranim na slučajnom pristupu medijumu koji generalno ne ostvaruju zadovoljavajuće performanse u podvodnim okruženjima, naročito pri velikom opterećenju, jer povećanje broja paketa u mreži značajno povećava i vjerovatnoću kolizija.

Kompleksniji protokoli zasnovani na takmičenju uključuju tehnike osluškivanja stanja na kanalu (CSMA) sa ciljem detektovanja (CSMA/CD) ili sprečavanja (CSMA/CA [18]) kolizija. Najzastupljeniji protokoli koji koriste osluškivanje kanala su DACCAP (*Distance Aware Collision Avoidance Protocol*) [19] i Tone-Lohi [20]. U prvom dijelu frejma Tone-Lohi protokola mrežni čvorovi pokušavaju da rezervišu medijum za slanje paketa podataka kroz seriju *contention-round* intervala. Kada u određenom *contention-round*-u samo jedan čvor pošalje pošalje CTD (*contention tone*) on dobija pravo da šalje paket podataka u tom frejmu. Kako bi se dodatno uštedjela energija, prijemnik kod Tone-Lohi protokola nije aktivan tokom perioda rezervacije kanala već se u stanje osluškivanja uvodi pristizanjem *wake-up* tona koji mrežni čvorovi šalju neposredno pred slanje paketa podataka. DACAP koristi RTS (*Request To Send*) i CTS (*Clear To Send*) poruke kako bi se prije slanja svakog paketa izvršila rezervacija kanala. U slučaju da nakon slanja CTS poruke mrežni čvor detektuje strani paket, odmah šalje poruku upozorenja čvoru kojem je poslao CTS. Sa druge strane, čvor koji je primio CTS paket ima definisan period čekanja (*bac-koff* interval) tokom kojeg može da primi paket upozorenja ili detektuje drugi paket na medijumu. U tom slučaju transmisija se odlaže. Oba navedena protokola trpe zbog velikog propagacionog kašnjenja, koje negativno utiče na performanse jer se značajno vrijeme nepotrebno troši na osluškivanje kanala.

Sličan pristup predstavljen je i u radu [21]. Slotted-FAMA (*Floor Acquisition Multiple Access*) [22], kao i DACAP, koristi RTS i CTS poruke za izbjegavanje kolizija sa razlikom što mrežni čvor nakon slanja RTS paketa naredna dva slota osluškuje kanal čekajući odgovor (CTS). Ako ga primi, na početku prvog sledećeg slota šalje paket podataka, dok u suprotnom obustavlja transmisiju i na slanje narednog RTS paketa čeka određeni broj slotova.

PCAP (*Propagation-delay-tolerant Collision Avoidance Protocol*) [23] i DOTS [24] protokoli takođe koriste RTS i CTS poruke. RTS i CTS poruke kod PCAP protokola sadrže informacije o jačini primljenog signala, vremenu nastanka paketa i predlogu vremena za slanje paketa podataka. Na ovaj način, mrežnim čvorovima

se omogućava da dok čekaju CTS paket prenesu prethodni paket podaka ili obave novi RTS-CTS *handshaking*. DOTS na osnovu poruka koje se razmjenjuju mrežom i propagacionih kašnjenja kreira mapu udaljenosti čvorova u mreži koju koristi za donošenje odluka za optimizovan pristup kanalu.

1.2 MAC protokoli bez takmičenja za pristup kanalu

U domenu protokola bez takmičenja za pristup kanalu (*contention-free* kategorija), koji nastoje da izbjegnu kolizije, koriste se tradicionalne tehnike višestrukog pristupa, slično kao u terestričkim radio mrežama: TDMA, FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) i CDMA (*Code Division Multiple Access*) [25].

TDMA funkcioniše tako što dijeli vrijeme na slotove i dodijeljuje ih različitim čvorovima, čime se obezbjeđuje da samo jedan čvor prenosi podatke u svakom slotu. Iako TDMA funkcioniše efikasno u terestričkim radio mrežama, njegova efikasnost u podvodnim akustičnim mrežama je veoma mala zbog velikih propagacionih kašnjenja. U radovima [26] i [27] su predložena unaprijeđenja rasporeda slanja paketa kod klasičnog TDMA protokola u cilju povećanja efikasnosti, ali uprkos prilagođavanjima nisu postignute zadovoljavajuće performanse zbog potrebe za striktnom sinhronizacijom koju je u podvodnom okruženju teško ostvariti. Posebno interesantan je pristup opisan u [28], gdje se predlaže TDMA protokol bez potrebe za sinhronizacijom, poznat kao TDA-MAC (*Time Division Multiple Access without Synchronization*). Ovaj pristup nastoji da eliminiše potrebu za vremenskom sinhronizacijom između čvorova, čime se smanjuje složenost implementacije u podvodnim uslovima.

CDMA omogućava čvorovima da koriste cijelokupan frekvencijski opseg istovremeno tako što se podaci kodiraju specifičnim kodovima, što omogućava razlikovanje signala različitih čvorova čak i kada se preklapaju. Prema radu [6], CDMA je pogodan za plitke vode gdje je *multipath* feding izražen jer njegovi kodovi mogu ublažiti efekte višestrukih puteva signala, što doprinosi stabilnijoj komunikaciji. Međutim, dekodiranje CDMA signala zahtijeva napredne algoritme koji mogu biti energetski zahtjevni i složeni za implementaciju na čvorovima sa ograničenim resursima.

FDMA tehnika, koja dijeli raspoloživi frekvencijski opseg na više nezavisnih kanala, smatra se neefikasnom u UASN mrežama zbog ograničenog propusnog opsega.

Naime, akustični komunikacioni kanali u podvodnom okruženju tipično imaju opseg od svega nekoliko desetina kiloherca [29], što značajno limitira broj raspoloživih kanala i brzinu prenosa podataka. Kao alternativno rješenje, u literaturi je razmatrana primjena OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) tehnike [29], koja omogućava efikasniju upotrebu ograničenog frekvencijskog opsega. OFDMA se zasniva na dijeljenju raspoloživog frekvencijskog opsega na više međusobno ortogonalnih podnosilaca. Svaki od ovih podnosilaca može se posmatrati kao nezavisan komunikacioni kanal za prenos podataka. Ortogonalnost podnosilaca omogućava njihovo gusto pakovanje u frekvencijskom domenu, što dovodi do efikasnije upotrebe spektra. Međutim, i OFDMA se suočava sa određenim izazovima u UASN mrežama. Prije svega, uslijed ograničenog frekvencijskog opsega, svaki mrežni čvor dobija relativno mali dio spektra, što se negativno odražava na brzinu prenosa podataka. Pored toga, OFDMA zahtijeva preciznu vremensku i frekvencijsku sinhronizaciju između čvorova, što je teško postići u podvodnim uslovima zbog izraženih i varijabilnih kašnjenja i Doplerovog efekta. Ovi fenomeni mogu dovesti do pojave interferencije među čvorovima i degradacije performansi mreže.

1.3 Hibridni MAC protokoli

Pored standardnih pristupa, u literaturi su predložena i hibridna rješenja za MAC protokole u podvodnim akustičnim mrežama. Hibridni MAC protokoli kombinuju različite mehanizme pristupa kanalu, poput TDMA, CSMA, CDMA, itd., sa ciljem postizanja optimalnog balansa između propusnosti i vjerovatnoće kolizija, prilagođavajući se specifičnim potrebama mreže, topologiji i prirodi saobraćaja [30].

UPMAC (*Underwater Protocol for Multiple Access Control*) [31] primjenjuje različite pristupe u zavisnosti od opterećenja mreže, prilagođavajući se uslovima male ili velike saobraćajne aktivnosti. Pri malom opterećenju, protokol funkcioniše slično ALOHA protokolu, dok pri velikom opterećenju - kada je jedan čvor primalac za 3 ili više simultanih paketa, ovaj čvor i potencijalni pošaljoci formiraju virtualni klaster u kome razmjenjuju međusobna rastojanja i raspored prenosa, odnosno protokol koristi *receiver-based* tehniku.

UW-MAC (*Underwater MAC*) [32] koristi povratnu spregu na način što pokušava da optimizuje dužinu paketa i transmisionu snagu na osnovu kompleksnih matematičkih proračuna koji uključuju i parametre kanala u cilju smanjenja kumulativne interferencije. ALOHA protokol se koristi za slanje signalizacionih poruka, dok se za

prenos paketa podataka koristi CDMA tehnika.

Hybrid-MAC predstavljen u [33] kombinuje ALOHA-CS (*Carrier sensing* i TD-MA pristupe tako što u prvom dijelu frejma čvorovi imaju egzaktan raspored slanja (karakteristika TDMA pristupa), što garantuje stabilnost i određene brzine prenosa, dok se u drugom dijelu frejma prelazi na ALOHA pristup koji omogućava adaptaciju količini saobraćaja.

1.4 Primjena mašinskog učenja u dizajnu MAC protokola

U novijim istraživanjima primijenjene su tehnike mašinskog učenja za dizajn MAC protokola [34]. Prednost MAC-a zasnovanog na učenju proizilazi iz njegove sposobnosti da nauči i održi (skoro)optimalnu strategiju prenosa u dinamičnom okruženju. Takođe, algoritmi zasnovani na učenju obično se mogu implementirati distribuirano, a komunikaciono opterećenje je tipično veoma malo. Navedene karakteristike su veoma poželjne za podvodne senzorske mreže koje se odlikuju ograničenim resursima i funkcionišu u nepredvidljivom podvodnom okruženju.

Learning-based ALOHA protokol za podvodne akustične mreže predstavljen je u [35], gdje je pokazano da značajno nadmašuje performanse klasičnih ALOHA varijanti. Kod ovog protokola mrežni čvorovi biraju slot za slanje paketa podataka i u slučaju kolizije odlučuju da li će paket opet slati u istom trenutku u slotu ili će slanje odložiti za vrijeme prenosa paketa (obje vjerovatnoće su 0.5). Na ovaj način, mrežni čvorovi mogu da prilagode vrijeme slanja paketa tako da na prijemniku ne dolazi do kolizija.

ALOHA-QIR protokol, predstavljen u [36] takođe koristi pojačano učenje u kombinaciji sa slotted-ALOHA pristupom kako bi poboljšao efikasnost pristupa kanalu. Mrežni čvorovi biraju slot na osnovu Q-tabele koja se ažurira na osnovu uspješnosti prethodnih transmisija. ALOHA-QIR takođe značajno štedi energiju tako što održava mrežne čvorove u neaktivnom stanju pomoću posebnog MAC zaglavlja koje sadrži raspored slanja čvora koji je poslao paket. Na ovaj način prijemnik zna kada treba da očekuje paket, a ostatak vremena ne troši resurse na bespotrebno osluškivanje.

ALOHA-Q protokol, predstavljen u [37], koristi tehniku Q-učenja [38] za optimizaciju MAC odluka. Ovaj protokol je nastao kao kombinacija *learning-based* ALO-

HA protokola [35] i TDA-MAC-TDMA protokola [28]. TDA-MAC-TDMA koristi klasične TDMA principe ali bez potrebe za sinhronizacijom između čvorova, čime se izbjegavaju problemi povezani sa sinhronizacijom u UASN mrežama. Ipak, zbog nedostatka sinhronizacije, TDA-MAC-TDMA troši vrijeme na prikupljanje informacija o mreži, kao što su procjene udaljenosti pojedinih čvorova od prijemne stanice. Nasuprot tome, ključna prednost *learning-based* ALOHA protokola leži u činjenici da čvorovi ne troše vrijeme na prikupljanje informacija o mreži, već kroz pokušaje prenosa podataka stiču uvid o uslovima na kanalu i adaptiraju svoje šeme prenosa. ALOHA-Q kombinuje prednosti ova dva pristupa — organizaciju vremenskih slotova bez potrebe za sinhronizacijom (TDA-MAC-TDMA) i adaptivnost učenja (*learning-based* ALOHA). Ovaj protokol je prvobitno razvijen za terestričke mreže kao poboljšana verzija *framed*-ALOHA protokola.

Kao adaptacije ALOHA-Q protokola za UASN mreže, razvijeni su UW-ALOHA-Q [5] i UW-ALOHA-QM [39] protokoli. Ovi protokoli su prilagođeni specifičnim izazovima podvodnih mreža, kao što su velika propagaciona kašnjenja i varijabilni uslovi kanala, čime su zadržali efikasnost i adaptivnost u podvodnim aplikacijama.

Protokoli zasnovani na jednostavnim algoritmima pojačanog učenja, kao što su ALOHA-Q i slični pristupi, pokazali su se efikasnima u mrežama sa manjim brojem čvorova i stabilnijim uslovima kanala [39]. Međutim, njihove ograničene sposobnosti prilagođavanja mogu predstavljati prepreku za primjenu u kompleksnijim i dinamičnijim mrežnim okruženjima. U radovima [40] i [41], predstavljeni su MAC protokoli koji koriste naprednije tehnike, poput dubokih neuronskih mreža (DNN - *Deep Neural Networks*), koje omogućavaju dublju analizu mrežnih uslova i bolju optimizaciju strategija prenosa. Ovi protokoli mogu da uče složenije obrasce interakcije od protokola baziranih na Q-učenju, međutim, njihova implementacija predstavlja značajan izazov ne samo u UASN mrežama, već i u zemaljskim bežičnim senzorskim mrežama (WSN - *Wireless Sensor Networks*) koje karakterišu slična resursna ograničenja. Ograničeni računarski resursi i energetski budžet čvorova u ovim mrežama čine primjenu računarski zahtjevnih DNN algoritama nepraktičnom [42]. Visoka računska složenost i, posljedično, velika potrošnja energije pri izvršavanju ovih algoritama mogu drastično smanjiti životni vijek čvorova i ugroziti dugotrajno funkcionisanje mreže. Pored računske složenosti, još jedan izazov u primjeni ovih protokola predstavlja dugo vrijeme konvergencije. U realnim operativnim scenarijima, gdje se mrežni uslovi i saobraćajno opterećenje dinamički mijenjaju, sporo prilagođavanje novonastalim okolnostima može značajno degradirati performanse

mreže. Ako algoritam zahtijeva previše vremena da konvergira ka optimalnoj strategiji, njegove akcije mogu postati neusklađene sa trenutnim stanjem mreže, što dovodi do suboptimalnih odluka i neefikasnog korišćenja resursa. Ovo ograničenje dovodi u pitanje primjenjivost protokola zasnovanih na DNN tehnikama u dinamičnim UASN okruženjima, gdje je brza adaptacija ključna za održavanje visokih performansi.

1.5 Simulaciona okruženja

Iako protokoli zasnovani na mašinskom učenju često nadmašuju tradicionalna rješenja, poput TDMA i ALOHA, u pogledu performansi, ostaje otvoreno pitanje pouzdanosti rezultata i validnosti simulacionih okruženja u kojima su testirani. U dosadašnjim istraživanjima nedovoljno pažnje posvećeno je detaljnem modelovanju podvodnog akustičnog kanala, koji ima ključnu ulogu i značajan uticaj na performanse protokola [43]. Zaključci prethodnih radova koji se bave protokolima za UASN mreže zasnovanim na mašinskom učenju često zanemaruju ključne izazove poput nasumičnih gubitaka paketa zbog loših propagacionih uslova, varijabilnosti u propagacionim kašnjenjima i uticaja šumova u podvodnom okruženju. Ovi faktori imaju značajan uticaj na konvergenciju algoritama mašinskog učenja, jer otežavaju donošenje jasnih zaključaka o tome da li je do gubitka paketa došlo zbog pogrešne odluke čvora ili zbog nepovoljnih uslova na kanalu.

Popularni mrežni simulatori kao što su NS (sa Aqua-sim modulom [44]) i OM-NET++ [45] nude određene mogućnosti za modelovanje podvodnog akustičnog kanala, ali su te mogućnosti veoma ograničene. Kao rezultat, validnost zaključaka izvedenih na osnovu simulacija koje koriste ove alate često je upitna. S obzirom na ove izazove, istraživači sa Univerziteta u Padovi razvili su DESERT simulator [4], specijalizovan za ispitivanje protokola u podvodnim akustičnim senzorskim mrežama. Ovaj simulator pruža širok spektar modula za detaljno modelovanje fizičkog sloja komunikacije, uključujući realistične efekte propagacije zvuka u vodi, šumova i varijabilnosti uslova kanala, što ga čini pogodnim za testiranje i razvoj naprednih MAC protokola.

Simulaciona analiza u ovom radu sprovedena je korišćenjem DESERT simulatora za implementaciju i evaluaciju svih razmatranih protokola. Ovakav pristup omogućava detaljno ispitivanje performansi u realističnim podvodnim uslovima, što doprinosi većoj pouzdanosti i validnosti zaključaka o efikasnosti MAC protokola zasnovanih na mašinskom učenju u UASN mrežama.

Glava 2

Pojačano učenje

2.1 Uvod

Mašinsko učenje, kao grana vještačke inteligencije, obuhvata širok spektar algoritama i tehnika koje omogućavaju računarskim sistemima da uče iz podataka i iskustva. U fokusu ovog poglavlja je pojačano učenje (*Reinforcement Learning* - RL), poseban tip mašinskog učenja koji se pokazao izuzetno korisnim u rješavanju kompleksnih problema odlučivanja. Pojačano učenje se može definisati kao proces u kojem agent uči optimalno ponašanje kroz interakciju sa okolinom. Za razliku od nadgledanog učenja, gdje se model trenira na označenim podacima, ili nenadgledanog učenja, koje traži skrivene strukture u podacima, pojačano učenje se oslanja na sistem nagrada i kazni kako bi agent naučio optimalnu strategiju djelovanja [46].

Primjene pojačanog učenja su raznovrsne i obuhvataju neka od najnaprednijih područja tehnologije, uključujući:

- Autonomnu vožnju: Gdje RL algoritmi omogućavaju vozilima da nauče navigaciju kroz kompleksne saobraćajne scenarije.
- Generativne predtrenirane transformatore (GPT modele): Koji koriste RL tehnike za fino podešavanje i optimizaciju performansi u zadacima obrade prirodnog jezika.
- Vještačku inteligenciju u video igrama: Gdje RL omogućava kreiranje agenata koji mogu samostalno naučiti da igraju i savladaju kompleksne igre.

Međutim, primjena pojačanog učenja u UASN mrežama predstavlja poseban izazov zbog njihovih specifičnih ograničenja. UASN mreže karakterišu ograničeni

računarski i baterijski resursi senzorskih uređaja, velika propagaciona kašnjenja i varijabilni uslovi na komunikacionom kanalu. Ograničeni resursi značajno otežavaju implementaciju složenih RL algoritama koji se često oslanjaju na duboke neuralne mreže i zahtijevaju značajne računarske resurse. Velika propagaciona kašnjenja otežavaju pravovremeno dobijanje povratnih informacija (nagrada) u RL sistema, što može dovesti do neoptimalnih odluka i sporije konvergencije algoritama, dok varijabilnost kanala utiče na pouzdanost prenosa podataka, što može rezultirati nepotpunim ili netačnim informacijama za RL agente.

U ovom poglavlju, predstavljeni su osnovni koncepti pojačanog učenja, sa posebnim fokusom na jednostavnije algoritme koji se mogu efikasno implementirati u resursno ograničenim okruženjima. Cilj je pružiti sveobuhvatan pregled teorijskih osnova ovih algoritama, postavljajući temelje za njihovu potencijalnu primjenu u optimizaciji protokola i upravljanju resursima u UASN mrežama. Konkretno, obrađene su sledeće teme:

- Markovljevi procesi odlučivanja, koji predstavljaju teorijski okvir za formalizaciju i analizu donošenja odluka u nepredvidljivim okruženjima.
- Q-učenje kao fundamentalni algoritam pojačanog učenja i njegove varijacije; Fokus je na razumijevanju principa Q-učenja i kako se može prilagoditi za efikasnu implementaciju u resursno ograničenim sistemima.
- *Multi-armed bandits* problem; Ovaj jednostavniji oblik problema pojačanog učenja je posebno koristan u sistemima sa ograničenim resursima gdje je potrebno balansirati između istraživanja i eksploatacije.
- Multi-agentni sistemi i izazovi koje predstavljaju u primjeni pojačanog učenja. Razmatrano je kako se principi pojačanog učenja mogu primijeniti u distribuiranim sistemima, uzimajući u obzir ograničenja u komunikaciji i koordinaciji među agentima.

2.2 Markovljev proces odlučivanja

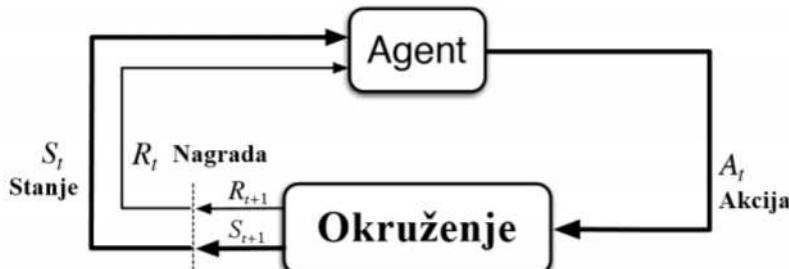
Markovljev proces odlučivanja (*Markov Decision Process* - MDP) predstavlja matematički okvir za modelovanje procesa donošenja odluka u situacijama gdje su ishodi dijelom slučajni, a dijelom pod kontrolom donosioca odluka. U kontekstu resursno ograničenih mreža, MDP pruža moćan alat za modelovanje različitih scenarija, od upravljanja energijom do optimizacije protokola.

MDP se formalno opisuje sljedećim elementima:

- **Skup stanja S** : Skup svih mogućih stanja u kojima se okruženje može nalaziti.
- **Skup akcija A** : Skup svih mogućih akcija koje agent može preuzeti u svakom stanju.
- **Funkcija nagrade R** : Funkcija nagrađivanja koja dodjeljuje vrijednost nagrade agentu pri prelasku iz jednog stanja u drugo uslijed izvršene akcije.
- **Vjerovatnoća prelaska $P(s_{t+1}|s_t, a)$** : Vjerovatnoća da će akcija a u stanju s_t u vremenskom trenutku t rezultirati stanjem s_{t+1} u trenutku $t + 1$.
- **Nagrada prelaska $R(s_t, a, s_{t+1})$** : Trenutna ili očekivana nagrada koja se dobija nakon prelaska iz stanja s_t u stanje s_{t+1} kao rezultat akcije a .
- **Faktor umanjenja $\gamma \in [0, 1]$** : Parametar koji određuje koliko se važnosti pridaje trenutnim nagradama u odnosu na buduće nagrade; manji faktor umanjenja stavlja naglasak na neposredne nagrade, dok veći favorizuje dugoročne ciljeve.

Kao što je detaljno objašnjeno u [47], osnovni problem u okviru MDP-a je naalaženje optimalne politike odlučivanja π , koja definiše strategiju prema kojoj agent bira akcije u svakom stanju, s ciljem maksimizacije kumulativne očekivane nagrade tokom vremena. U svakom vremenskom koraku t , agent opaža trenutno stanje okoline s_t i, na osnovu tog opažanja, odlučuje koju akciju a_t da preuzme, u skladu sa politikom π . Nakon izvršenja akcije a_t , u narednom koraku $t + 1$, agent prima odgovarajuću nagradu r_{t+1} i okruženje prelazi u novo stanje s_{t+1} .

Ova interakcija između agenta i okruženja često se modeluje kao ciklički proces povratne sprege, gdje odluke agenta direktno utiču na razvoj stanja okruženja, što je ključno za iterativno prilagođavanje strategije u svrhu optimizacije performansi. Grafički prikaz ove interakcije može se vidjeti na slici 2.1.



Slika 2.1: Grafički prikaz interakcije agenta sa okruženjem.

2.3 Q-učenje

Q-učenje predstavlja jedan od najznačajnijih algoritama u oblasti pojačanog učenja koji omogućava agentu da uči iz sopstvenog iskustva i iterativno pronalazi optimalnu strategiju odlučivanja u okviru konačnog Markovljevog lanca.

Centralni element ovog algoritma je Q-tabela, koja funkcioniše kao memorija agenta, u kojoj se pohranjuju informacije o vrijednostima nagrada povezanih s različitim akcijama u različitim stanjima. Analogno treniranju psa, poželjne akcije se nagrađuju kako bi se ohrabriло takvo ponašanje, dok se nepoželjne akcije kažnjavaju, s ciljem maksimizacije ukupne kumulativne nagrade kroz vrijeme.

Zadatak maksimizovanja ukupne nagrade tokom vremena formalizuje se kroz uvođenje funkcije nagrade. Pod pretpostavkom da je agent u vremenskom koraku t i da je završni vremenski korak zadatka (tzv. epizode) $T > t$, funkcija nagrade za korak t definiše se kao suma svih nagrada počevši od nagrade u koraku $t+1$ do nagrade u koraku T :

$$R_t = R_{t+1} + R_{t+2} + R_{t+3} + \dots + R_T \quad (2.1)$$

Zadaci kod kojih ne postoji definisan završni korak nakon kojeg bi se moglo reći da je agent završio zadatak nazivaju se kontinualnim, pri čemu je $T = \infty$. S druge strane, zadaci kod kojih je $T < \infty$ su epizodni. Kako bi se izbjegao problem beskonačnog dobitka kod kontinualnih zadataka, uvodi se faktor umanjenja γ , pa se funkcija dobitka za korak t oblikuje na sledeći način:

$$R_t = \sum_{k=0}^T \gamma^k r_{t+1+k} \quad (2.2)$$

U svakom vremenskom koraku, agent se nalazi u određenom stanju i bira akciju koju će preuzeti. Vjerovatnoća da će agent u stanju s izabrati akciju a predstavljena je politikom π , odnosno $\pi(a|s)$. Funkcija vrijednosti stanja za politiku π , označena kao $V_\pi(s)$, definiše se kao očekivana vrijednost nagrade pod uslovom da se agent nalazi u stanju s , prema jednačini:

$$V_\pi(s) = E_\pi[R_t | s_t = s] \quad (2.3)$$

Analogno, funkcija vrijednosti akcije u datom stanju za politiku π , označena kao

$Q_\pi(s, a)$, definiše se kao očekivana vrijednost nagrade pod uslovom da se agent nalazi u stanju s i preduzima akciju a :

$$Q_\pi(s, a) = E_\pi[R_t | s_t = s, a_t = a] \quad (2.4)$$

Politika π se smatra boljom ili jednakom politici π' ako i samo ako $V_\pi(s) \geq V_{\pi'}(s)$ za svako stanje $s \in S$. Ovo znači da je očekivana vrijednost nagrade, počevši od bilo kog stanja i prateći politiku π , uvijek veća ili jednaka očekivanoj vrijednosti nagrade prateći politiku π' . Na osnovu ovog poređenja, možemo definisati optimalnu politiku π^* kao onu koja je bolja ili jednaka svim ostalim politikama. Formalno, $\pi^* = \arg \max_\pi V_\pi(s)$, za svako $s \in S$. Važno je napomenuti da može postojati više od jedne optimalne politike, ali sve one imaju istu optimalnu funkciju vrijednosti. Matematički, optimalnu politiku π^* možemo definisati u terminima optimalne Q-funkcije:

$$\pi^*(s) = \arg \max_a Q^*(s, a) \quad (2.5)$$

gdje je $Q^*(s, a)$ optimalna Q-funkcija koja predstavlja maksimalnu očekivanu kumulativnu nagradu počevši od stanja s , preduzimajući akciju a , a zatim prateći optimalnu politiku.

Iako može postojati više optimalnih politika, važno je istaći da su optimalna funkcija vrijednosti V^* i optimalna Q-funkcija Q^* jedinstvene. Ova teorema o jedinstvenosti optimalne funkcije vrijednosti ima značajne implikacije za dizajn i analizu algoritama pojačanog učenja.

U praktičnim primjenama, cilj algoritama pojačanog učenja je aproksimirati optimalnu politiku ili optimalnu Q-funkciju. Ovo je posebno izazovno u složenim okruženjima ili kada je prostor stanja/akcija veliki, što je često slučaj u realnim primjenama poput upravljanja mrežnim resursima. Razumijevanje koncepta optimalne politike je ključno za razvoj i analizu algoritama pojačanog učenja, posebno u kontekstu resursno ograničenih sistema gde je efikasno pronađenje optimalne ili približno optimalne politike od velike važnosti.

2.3.1 Ažuriranje Q-vrijednosti i strategije istraživanja

U Q-učenju, znanje agenta o vrijednosti parova stanje-akcija (s, a) čuva se u strukturi podataka zvanoj Q-tabela. Nakon svake interakcije sa okolinom, agent ažurira odgovarajuću Q-vrijednost. Konkretno, u vremenskom trenutku $t + 1$, nakon

što je agent primio nagradu r_{t+1} i sistem prešao u novo stanje s_{t+1} , ažuriranje Q-vrijednosti za par (s_t, a_t) vrši se prema formuli:

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow (1 - \alpha)Q(s_t, a_t) + \alpha(r_{t+1} + \gamma \max_{a'} Q(s_{t+1}, a')) \quad (2.6)$$

gdje je $\alpha \in (0, 1]$ stopa učenja koja određuje koliko brzo se ažuriraju stare vrijednosti, a $\gamma \in [0, 1]$ je faktor umanjenja koji balansira između neposrednih i budućih nagrada.

Jedan od fundamentalnih izazova u pojačanom učenju je balansiranje između istraživanja novih mogućnosti i eksploatacije trenutnog znanja. Ova dilema se manifestuje u svakom koraku odlučivanja agenta, i može se posmatrati kroz dva ključna aspekta učenja:

- **Istraživanje:** Agent bira akcije koje nisu nužno optimalne prema trenutnom znanju, s ciljem otkrivanja novih, potencijalno boljih strategija. Ovo može dovesti do većih dugoročnih nagrada, ali nosi rizik kratkoročnih gubitaka.
- **Eksploatacija:** Agent bira akcije koje maksimizuju očekivanu nagradu prema trenutnom znanju. Ovo osigurava dobre kratkoročne rezultate, ali može dovesti do zaglavljivanja u suboptimalnim strategijama.

Balansiranje ova dva pristupa je ključno za efikasno učenje. Previše istraživanja može rezultirati neefikasnim lutanjem, dok pretjerana eksploatacija može spriječiti agenta da otkrije bolje strategije.

Jedan od popularnih pristupa za rješavanje dileme istraživanja vs. eksploatacije je ϵ -greedy algoritam. Ova strategija uvodi kontrolisani element slučajnosti u proces odlučivanja:

$$a_t = \begin{cases} \arg \max_{a'} Q(s_t, a') & \text{sa vjerovatnoćom } 1 - \epsilon \\ \text{nasumična akcija} & \text{sa vjerovatnoćom } \epsilon \end{cases} \quad (2.7)$$

Ovdje $\epsilon \in [0, 1]$ predstavlja vjerovatnoću istraživanja. Ova strategija omogućava agentu da:

- Sa vjerovatnoćom $1 - \epsilon$ bira akciju koja maksimizuje očekivanu nagradu prema trenutnim Q-vrijednostima (eksploatacija).
- Sa vjerovatnoćom ϵ bira nasumičnu akciju, nezavisno od trenutnih Q-vrijednosti (istraživanje).

Vrijednost ϵ se često smanjuje tokom vremena, omogućavajući agentu da više istražuje na početku, a zatim postepeno prelazi na eksploraciju kako stiče više znanja o okolini.

2.3.2 Karakteristike Q-učenja

Q-učenje se ističe kao posebno efikasan algoritam pojačanog učenja, prvenstveno zbog svojih *model-free* i *off-policy* karakteristika [48]. Ove osobine čine ga izuzetno pogodnim za primjenu u složenim i dinamičkim okruženjima, uključujući i resursno ograničene sisteme poput podvodnih akustičnih mreža.

Q-učenje spada u kategoriju *model-free* algoritama, što znači da agent ne zahtijeva eksplicitno modelovanje dinamike okoline. Agent uči optimalnu politiku direktno kroz interakciju sa okolinom, bez potrebe za prethodnim znanjem o tome kako okolina funkcioniše ili generiše nagrade. Umjesto da pokušava razumjeti i predvidjeti ponašanje okoline, agent se fokusira na optimizaciju sopstvenog ponašanja na osnovu primljenih nagrada. Ova karakteristika čini Q-učenje posebno robusnim u situacijama gdje je teško ili nemoguće precizno modelovati okolinu, što je često slučaj u realnim, kompleksnim sistemima.

Posledica *model-free* pristupa je da agent ne može unaprijed predvidjeti tačnu nagradu za određenu akciju, već uči isključivo iz posljedica svojih akcija. Ovo može zahtijevati više iteracija za učenje, ali omogućava veću fleksibilnost i prilagodljivost promjenljivim uslovima okoline.

Off-policy priroda Q-učenja odnosi se na sposobnost agenta da uči optimalnu politiku nezavisno od politike koju koristi za istraživanje okoline. Naime, agent može slijediti jednu politiku za interakciju sa okolinom, dok istovremeno uči i poboljšava drugu, potencijalno optimalnu politiku. Ova razdvojenost omogućava efikasnije istraživanje i eksploraciju, jer agent može učiti iz iskustava generisanih različitim politikama, uključujući i suboptimalne. *Off-policy* pristup je posebno koristan kada je proces prikupljanja podataka „skup“ ili rizičan, što je često slučaj u podvodnim akustičnim mrežama i drugim resursno ograničenim sistemima.

2.4 *Multi-armed bandits* problem

Problem Q-učenja generalno podrazumijeva da agent uči kako da se ponaša u više situacija (stanja). Eliminisanjem svih osim jednog stanja, gubi se kompleksnost

problema pojačanog učenja jer se dimenzija stanja gubi iz jednačina iz prethodnog poglavlja i problem se svodi na sledeće: agent bira između n opcija (akcija). Nakon svake akcije dobija numeričku nagradu, a cilj mu je i dalje da maksimizira kumulativnu nagradu tokom određenog vremena. Ovaj problem je poznat kao *n-armed bandit problem*. U literaturi najčešće je opisivan analogijom sa slot-mašinama [49]. Svaka akcija bi bila povlačenje jedne od ručica slot-mašine, a nagrada je dobijeni džekpot. Tokom vremena, agent treba da ostvari što veće dobitke biranjem najboljih ručica slot-mašine u datom trenutku. Podrazumijeva se da agent ne može da zna nagradu za određenu akciju, ali može da ima sopstvene prepostavke.

Ukoliko agent u svakom trenutku ima prepostavke o potencijalnim nagradama, jedna će uvijek biti najveća (ili više od jedne). U slučaju pohlepnog djelovanja, agent bira akciju za koju prepostavlja da će dobiti najveću nagradu. U suprotnom, agent može da odluči da istražuje, to jest da pokuša sa akcijom koja po njegovim prepostavkama neće donijeti najveću nagradu. Dakle, *Multi-armed bandits problem* predstavlja fundamentalni model za razumijevanje i rješavanje dileme istraživanja ili eksploracije u pojačanom učenju. Iako pojednostavljen u odnosu na opšti problem pojačanog učenja, ovaj model pruža ključne uvide koji se mogu primijeniti u složenijim scenarijima sa više stanja. Posebno je značajan za primjene u resursno ograničenim sistemima, gdje je efikasno donošenje odluka kritično.

2.5 Multi-agentni sistemi

Do sada je fokus ovog poglavlja bio na tehnikama pojačanog učenja koje se primjenjuju na pojedinačne agente. Međutim, mnogi realni scenariji, posebno u domenu komunikacionih mreža, zahtijevaju razmatranje interakcija između više agenata. Ovo nas dovodi do koncepta multi-agentnog pojačanog učenja (*Multi-Agent Reinforcement Learning* - MARL).

MARL proširuje koncept pojačanog učenja na sisteme u kojima više agenata simultano interaguje sa zajedničkim okruženjem. Ova interakcija može biti direktna (agenti međusobno komuniciraju) ili indirektna (akcije jednog agenta utiču na okruženje, a time i na druge agente). Ključni izazov u MARL-u je da akcije svakog agenta utiču ne samo na njegovo stanje i nagrade, već i na stanja i nagrade drugih agenata.

Multi-agentska okruženja se generalno mogu klasifikovati u dvije glavne kategorije: kooperativne i takmičarske. Kod kooperativnih okruženja, agenti se trude da

maksimizuju zajedničku, ukupnu nagradu dok u takmičarskim okruženjima agensi nastoje da maksimizuju svoju, a minimizuju nagrade ostalih agenata. Važno je napomenuti da mnogi realni scenariji sadrže elemente i kooperacije i takmičenja, stvarajući složena mješovita okruženja.

Postoje dva rješenja za dizajn multi-agentnih sistema: decentralizovani i centralizovani. Kod decentralizovanih sistema, agensi uče nezavisno jedni od drugih, tj. samo iz sopstvenih iskustava. To znači da agent posmatra ostale agente kao sastavni dio okruženja, a ne kao samostalne entitete. Iz ovoga proizilazi i najveća mana ovakvih sistema koja se ogleda u činjenici da posmatranje agenata kao dio okruženja čini okruženje nestacionarnim uslijed promjena u njihovom ponašanju. Sa druge strane, centralizovani pristup se bazira na tome da svi agenti uče iz zajedničkih iskustava koja se smještaju u bafer. Politika je ista za sve agente, što znači da svaki agent može predvidjeti naredne poteze ostalih agenata. Ovo posljedično čini okruženje stacionarnim.

Glava 3

Podvodni akustični kanal

Podvodni akustični kanali se generalno smatraju jednim od najzahtjevnijih komunikacionih medijuma koji se danas koriste. Akustično prostiranje je najbolje podržano na niskim frekvencijama, a propusni opseg dostupan za komunikaciju je izuzetno ograničen. Na primjer, akustični sistem može raditi u frekvencijskom opsegu između 10 i 15 kHz. Iako je ukupni komunikacioni propusni opseg veoma nizak (5 kHz), sistem je zapravo širokopojasni, u smislu da propusni opseg nije zanemarljiv u odnosu na centralnu frekvenciju. Zvuk se pod vodom prostire vrlo malom brzinom od približno 1500 m/s, a propagacija se odvija preko više putanja. Vremenska disperzija signala reda desetina ili čak stotina milisekundi rezultira frekvencijski selektivnim izobličenjem signala, dok kretanje stvara ekstremni Doplerov efekat.

U ovom poglavlju analizirane su karakteristike podvodnog akustičnog kanala i izazovi koje predstavlja za komunikacione sisteme. Prvi dio poglavlja bavi se ključnim izazovima komunikacije, uključujući Doplerov efekat, prostorno-vremensku neizvjesnost, zavisnost brzine propagacije od spoljašnjih faktora, *multipath* propagaciju, i efekte slabljenja i šuma. Drugi dio fokusiran je na modelovanje kanala, predstavljajući fizički model i model zasnovan na skrivenim Markovljevim modelima (*Hidden Markov Model* - HMM) implementirane u DESERT simulatoru. Cilj poglavlja je pružanje pregleda kompleksnosti podvodnog akustičnog kanala i postavljanje osnove za razumijevanje izazova u dizajnu efikasnih podvodnih akustičnih komunikacionih sistema.

Tabela 3.1: Poređenja karakteristika podvodnog i radio akustičnog kanala.

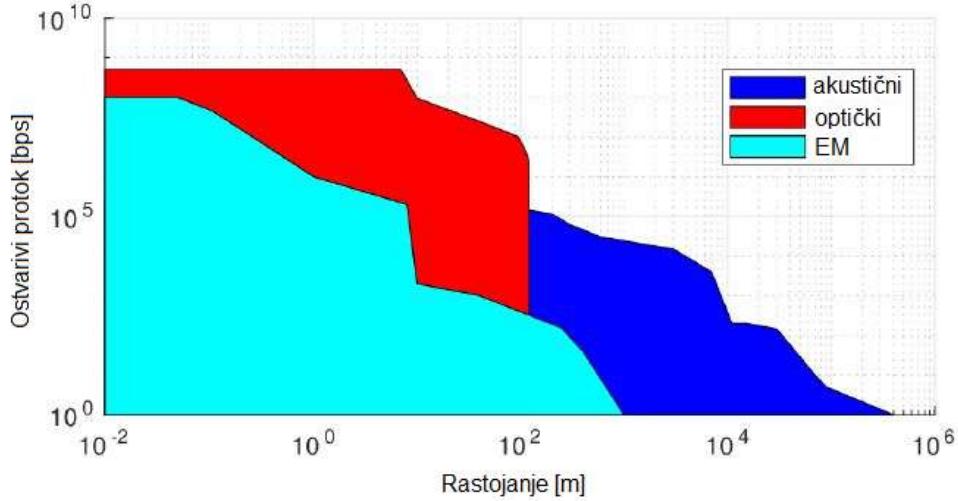
| | Podvodni kanal | Radio kanal |
|-----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Energetska efikasnost | Mala | Velika |
| Propagaciono kašnjenje | Veliko | Malo |
| Propusni opseg | Uzak | Širok |
| Informacioni kapacitet | Mali | Veliki |
| Nivo šuma i interferencija | Veliki | Mali |
| Dinamika promjena okruženja | Velika | Mala |
| Pouzdanost | Mala | Velika |
| Brzina prenosa | Mala ($1200 - 1400 m/s$) | Velika ($3 * 10^8 m/s$) |

3.1 Izazovi komunikacije u podvodnom akustičnom kanalu

Podvodni akustični kanal u poređenju sa nadzemnim radio kanalom ima mnogo nepovoljnije karakteristike, a generalno poređenje dato je u Tabeli 3.1. U nadzemnim bežičnim mrežama koriste se radio ili optičke tehnologije koje omogućavaju velike propusne opsege i imaju zanemarljivo propagaciono kašnjenje. Takođe, šumovi i smetnje su mnogo izraženiji u podvodnom kanalu pa je i potrošnja energije uređaja namijenjenih za ovakav vid medijuma očekivano veća. Zbog karakteristika podvodnog okruženja, elektromagnetni i optički talasi pod vodom su neupotrebljivi za komunikaciju na rastojanjima većim od par desetina metara. Da bi elektromagnetni talasi bili učinkoviti pod vodom potrebno je koristiti niske frekvencije (maksimalno par desetina KHz) i masivne metalne antene, veličine oko par kilometara [50]. Sa druge strane, zvučni talasi se prostiru dobro na niskim frekvencijama što ih čini logičnim izborom za podvodno okruženje. Na slici 3.1 dat je dijagram mogućih brzina prenosa i dometa za različite tehnologije.

Tabela 3.2: Mogući ostvarivi protoci i domet za različite frekvencijske opsege.

| | LF ($< 15kHz$) | MF ($< 40kHz$) | HF ($> 40kHz$) |
|--------|------------------|------------------|------------------|
| Protok | $< 2kbps$ | $< 10kbps$ | $< 1000kbps$ |
| Domet | $10 - 15km$ | $3km$ | $500m$ |



Slika 3.1: Moguće brzine i dometi propagacije pod vodom za različite tehnologije [1].

Frekvencije на којима се звук простире под водом могу се generalno podijeliti у 3 групе, а оствариви протоки и домет за сваку од њих дати су у Табели 3.2 из које се вidi да се коришћењем јако нискога фреквениција комуникација може остварити на великим растојањима али по цјену јако малога протока. Са повећањем фреквениције, протоки takođe rastu, али растојање на ком је комуникација могућа се смањује.

3.1.1 Doplerov efekat

Doplerov efekat predstavlja један од најзначајнијих изазова у подводној акустичној комуникацији. Главни узрок овог проблема лежи у relativno niskoj brzini простирања звука под водом, која iznosi oko 1500 m/s. Оваја brzina, која je znatno manja od brzine elektromagnetskih talasa, dovodi do niza komplikacija u подводном комуникационом систему. У подводном окружењу, mobilnost комуникационих елемената je gotovo neizbjеžna. Plutajuće платформе и сензорски чворови су под konstantnim uticajem prirodnih pojava као што су plima, talasi i morske struje, што

rezultira njihovim neprekidnim kretanjem. Dodatno, podvodna autonomna vozila mogu dostizati brzine od nekoliko m/s , što dodatno komplikuje situaciju. Ono što čini Doplerov efekat posebno izraženim u podvodnom akustičnom kanalu jeste značajan odnos između relativne brzine predajnika u odnosu na prijemnik i brzine prostiranja zvuka. Ovaj odnos može biti reda veličine 10^{-3} , što za posljedicu ima izuzetno izražen vremenski pomjeraj u vidu Doplerovog efekta [11]. Matematički, frekvencija koja dolazi do prijemnika može se izraziti formulom:

$$f_r = \frac{V + V_r}{V - V_s} \cdot f_s \quad (3.1)$$

gdje je:

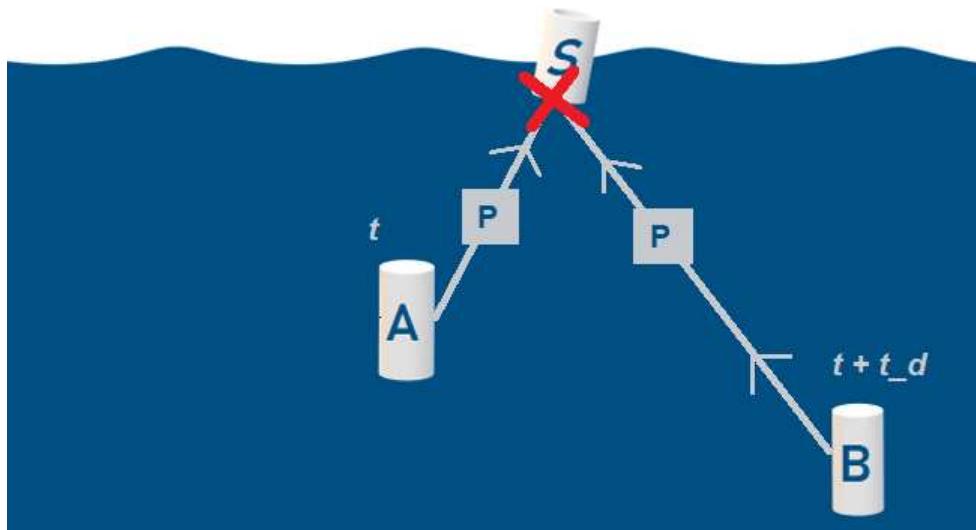
- f_r : frekvencija koju prima prijemnik
- V : brzina prostiranja zvuka u vodi
- V_r : brzina prijemnika
- V_s : brzina predajnika
- f_s : stvarna frekvencija emitovanog signala

Važno je napomenuti da što je veća brzina predajnika (a samim tim i prethodno pomenuti odnos), to je Doplerov efekat izraženiji. Ova činjenica dodatno otežava komunikaciju u scenarijima gdje su elementi mreže izuzetno mobilni. Implikacije Doplerovog efekta u podvodnom akustičnom kanalu su višestruke. Najznačajniji problemi javljaju se u domenu sinhronizacije i procjene stanja na kanalu. Promjena frekvencije prijemnog talasa uslijed mobilnosti elemenata mreže otežava preciznu detekciju i dekodiranje signala, što može dovesti do povećanja stope grešaka u komunikaciji [11]. Dodatni faktor koji treba uzeti u obzir je činjenica da se zvuk, zbog kompozicije vodene sredine, brže prostire vodom nego vazduhom. Iako ovo može djelovati kao prednost, zapravo predstavlja dodatan izazov u kontekstu Doplerovog efekta, jer povećava njegove efekte. Za prevazilaženje problema izazvanih Doplerovim efektom u podvodnom akustičnom kanalu, istraživači i inženjeri razvijaju napredne tehnike obrade signala i adaptivne algoritme koji mogu kompenzovati ove frekvencijske pomjeraje. Ove tehnike uključuju sofisticirane metode estimacije i korekcije Doplerovog pomjeraja, kao i robusne sheme modulacije koje su otpornije na ove efekte. Razumijevanje i efikasno suočavanje sa Doplerovim efektom ostaje jedno od ključnih područja istraživanja u oblasti podvodnih akustičnih komunikacija, s obzirom na njegov značajan uticaj na performanse i pouzdanost ovih sistema.

3.1.2 Prostorno-vremenska neizvjesnost

Još jedan fenomen uzrokovani brzinom propagacije zvuka je prostorno-vremenska neizvjesnost, detaljno opisan u [51]. Ovaj fenomen predstavlja jedinstveni izazov u dizajnu podvodnih akustičnih mreža, posebno u kontekstu razvoja efikasnih MAC protokola. U mobilnim radio mrežama, gdje je brzina propagacije signala značajno veća, opšta pretpostavka je da će istovremeno slanje paketa sa dva različita predajnika rezultirati kolizijom na prijemniku. Ova pretpostavka vodi ka dizajnu MAC protokola koji primarno nastoje spriječiti istovremeno slanje paketa od strane različitih predajnika. Međutim, ova logika ne važi pri dizajnu MAC protokola za podvodne akustične mreže. Zbog velikog propagacionog kašnjenja, koje je posledica relativno male brzine zvuka u vodi, raspored čvorova u mreži postaje kritičan faktor. Ova situacija dovodi do dva specifična scenarija:

- Istovremeno slanje bez kolizije:** Ako dva čvora sa različitim udaljenostima od prijemnika pošalju pakete istovremeno, zbog razlike u propagacionim kašnjenjima postoji značajna vjerovatnoća da neće doći do kolizije na prijemniku. U ovom slučaju, oba paketa mogu biti uspješno primljena, što predstavlja pozitivan efekat prostorno-vremenske neizvjesnosti.
- Vremenski razdvojeno slanje sa kolizijom:** Sa druge strane, u slučaju da dva čvora sa različitim rastojanjima od prijemnika pošalju pakete u različitim trenucima, postoji mogućnost da će doći do kolizije na prijemniku. Ovo se dešava kada paketi, uprkos različitom vremenu slanja, stignu na prijemnik u isto vrijeme ili sa preklapanjem. Ova pojava je grafički prikazana na slici 3.2.



Slika 3.2: Fenomen prostorno-vremenske neizvjesnosti.

Prostorno-vremenska neizvjesnost ima značajne implikacije na dizajn MAC protokola za podvodne akustične mreže:

- **Kompleksnost planiranja:** Tradicionalne metode izbjegavanja kolizija, poput CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*), postaju manje efikasne. Planiranje transmisija mora uzeti u obzir ne samo vrijeme slanja, već i prostorni raspored čvorova.
- **Potreba za preciznom lokalizacijom:** Efikasno upravljanje ovom neizvjesnošću zahtijeva precizno poznavanje pozicija čvorova, što je izazovno u dinamičnom podvodnom okruženju.
- **Oportunistički pristup:** U nekim slučajevima, prostorno-vremenska neizvjesnost može se iskoristiti za povećanje propusnosti mreže, dozvoljavajući istovremene transmisije koje ne bi bile moguće u tradicionalnim bežičnim mrežama.
- **Adaptivni algoritmi:** Razvoj adaptivnih MAC protokola koji mogu dinamički prilagođavati svoje parametre na osnovu trenutne konfiguracije mreže postaje ključan za optimizaciju performansi.

Razumijevanje i efikasno upravljanje prostorno-vremenskom neizvjesnošću predstavlja jedno od ključnih područja istraživanja u razvoju podvodnih akustičnih mreža. Ovaj fenomen značajno utiče na dizajn protokola na više nivoa OSI modela, od fizičkog sloja do sloja aplikacije, zahtijevajući inovativne pristupe koji prevazilaze tradicionalne koncepte bežičnih komunikacija.

3.1.3 Zavisnost brzine propagacije od spoljašnjih faktora

Iako se često kao brzina prostiranja zvuka pod vodom uzima $1500m/s$, u realnosti ta brzina varira u zavisnosti od temperature, saliniteta i pritiska. Povećava se za približno 1.3 m/s po povećanju saliniteta od 1 PSU , 4.5 m/s po porastu temperature od 1°C i $1.7m/s$ po povećanju pritiska od 1 dbar [52]. Ovo takođe dovodi do neočekivanih promjena u dijagramu propagacije signala i stvaranje takozvanih 'shadow' zona, tj. tačaka do kojih signal uslijed nekonzistentnosti gore navedenih parametara u realnom okruženju ne može da dopre. Najočigledniji primjer vezan za promjenu brzine zvuka u zavisnosti od temperature je *Afternoon effect*. *Afternoon effect* dolazi do izražaja u poslijepodnevnim satima kada je voda mirna, a sunce je tokom dana zagrijalo površinu vode tako da je razlika u temperaturi imedju par

metara površinskog i narednog dubinskog sloja značajna. Ako se predajnik postavi blizu površine, signal naglo skreće ka dubini, tj. ka okruženju sporije propagacije i dobija se neočekivan dijagram zračenja. U konkretnom slučaju, ako bi prijemnik bio postavljen na istoj dubini i određenom rastojanju, iako bi bilo očekivano da primi signal, u realnosti to ne bi bio slučaj.

3.1.4 *Multipath* propagacija

Multipath prostiranje je jedan od ključnih fenomena koji karakterišu podvodni akustični kanal. Signal se odbija od morskog dna, površine, raznih živih organizama pod vodom što uzrokuje pojavu eha koji na prijemnik stižu sa različitim kašnjenjima. Vremenska disperzija u podvodnom okruženju može biti i reda stotina milisekundi što može dovesti do pojave frekvencijski selektivnog kanala [53]. Zbog ovoga je na manjim dubinama čak i jačina vjetra faktor koji se ne smije zanemariti.

Formiranje višestrukih putanja u vodi je uslovljeno sledećim glavnim efektima: refleksijom zvuka od površine, dna i drugih objekata, te refrakcijom zvuka u vodi. Refrakcija je posljedica prostorne varijabilnosti brzine zvuka u vodi. Zrak zvuka se uvek savija prema regionu niže brzine prostiranja, prateći Snellov zakon [54]. U plitkim vodama, gdje se brzina zvuka može smatrati konstantnom, dužine putanja mogu se izračunati korišćenjem ravne geometrije, a kašnjenja putanja se mogu dobiti kao:

$$\tau_p = \frac{l_p}{c} \quad (3.2)$$

gdje je l_p dužina p -te putanje, a c brzina zvuka [54]. Impulsni odziv akustičnog kanala je pod uticajem geometrije kanala i njegovih refleksijskih i refrakcijskih svojstava, koji određuju broj značajnih propagacionih putanja, njihove relativne jačine i kašnjenja. Strogo govoreći, postoji beskonačno mnogo eha signala, ali oni koji su pretrpjeli višestruke refleksije i izgubili mnogo energije mogu se zanemariti, ostavljajući samo konačan broj značajnih putanja [54]. Svaka putanja akustičnog kanala djeluje kao niskopropusni filter. Ako označimo sa Γ_p kumulativni koeficijent refleksijske duž p -te propagacione putanje, a sa $A(l_p, f)$ propagacioni gubitak povezan s ovom putanjom, tada

$$H_p(f) = \frac{\Gamma_p}{A(l_p, f)} \quad (3.3)$$

predstavlja frekvencijski odziv p -te putanje. Ukupni impulsni odziv kanala se može predstaviti kao:

$$h(t) = \sum_p h_p(t - \tau_p) \quad (3.4)$$

gdje je $h_p(t)$ inverzna Furijeova transformacija od $H_p(f)$ [54]. U plitkim vodama, ukupna disperzija višestrukih putanja je obično reda desetina milisekundi, što je tipično opaženo u eksperimentima [54].

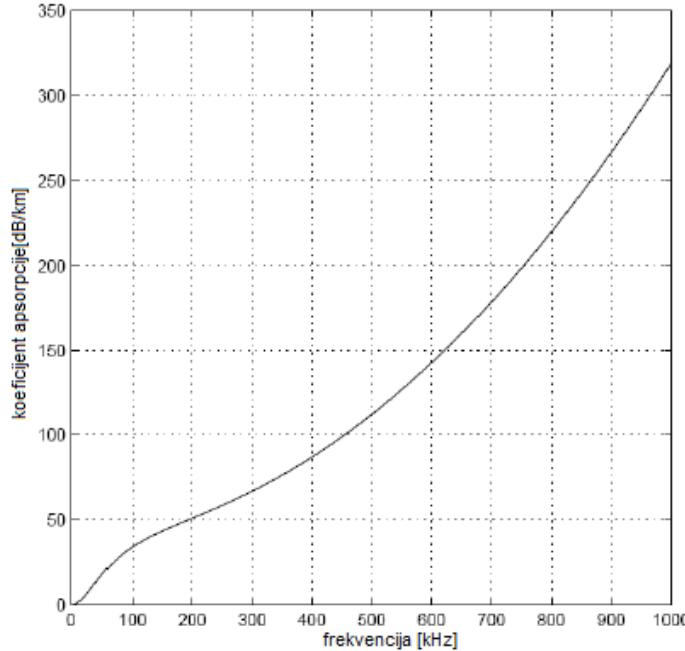
3.1.5 Slabljenje i šum

Zbog činjenice da su akustični talasi podložni efektu apsorpcije [2], odnosno pretvaranja njihove energije u toplotnu, u jednačini za gubitke uslijed propagacije (*path loss*) osim rastojanja figuriše i frekvencija. Matematička interpretacija propagacionog slabljenja prikazana je jednačinom (3.5). Sa povećanjem frekvencije, povećava se i koeficijent apsorpcije. Na slici 3.3 je dat grafički prikaz zavisnosti koeficijenta apsorpcije od frekvencije [2]. Slabljenje takođe raste sa povećanjem rastojanja, što ohrabruje upotrebu *multi-hopping* protokola rutiranja.

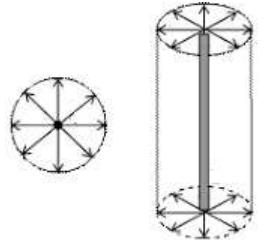
$$A(l, f) = l^k + a(f)^l \quad (3.5)$$

U (3.5), k je konstanta koja definiše tip prostiranja talasa, i u slučaju cilindričnog prostiranja ima vrijednost 1, dok u slučaju sferičnog prostiranja ima vrijednost 2. Razlika između ova dva tipa prostiranja prikazana je na slici 3.4. Propagaciono rastojanje označeno je sa l , a a je koeficijent apsorpcije koji se računa po Thorpovojoj formuli:

$$10\log a(f) = 0.11 \frac{f^2}{1 + f^2} + 44 \frac{f^2}{4100 + f} + 2.75 \cdot 10^{-4} \cdot f^2 + 0.003 \quad (3.6)$$



Slika 3.3: Koefficijent apsorpcije u podvodnom akustičnom kanalu kao funkcija frekvencije [2].



Slika 3.4: Sferično i cilindrično prostiranje.

Još jedan značajan problem podvodnih akustičnih komunikacija su šumovi. U vodi je uvijek prisutan ambijentalni šum koji potiče od talasa, kiše, udaljenih plovila, itd. Iako se ambijentalni šum često aproksimira kao Gausov, on nije bijeli šum. U [11] je pokazano da spektralna gustina ambijentalnog šuma opada sa porastom frekvencije, približno po stopi od 18 dB po dekadi.

Ostali, specifičniji izvori šuma uključuju lomljenje leda u polarnim oblastima, zvukove koje proizvode morski sisari i sl. Ovi izvori često imaju značajne ne-Gausove komponente. Takođe, moguće je naići na smetnje uzrokovane korišćenjem Echosounder ili USBL (*Ultra-Short Baseline*) uređaja.

Pri matematičkoj interpretaciji, šum se generalno modeluje kroz 4 komponente:

1. Turbulencijska

2. Šum koji potiče od plovila
3. Šum koji potiče od vjetra (odnosno površinskih talasa koje vjetar stvara)
4. Termalni šum

Način dobijanja ukupne spektralne gustine snage šuma, kao i njenih pojedinačnih komponenti prikazan je u jednačinama (3.7), (3.8a), (3.8b), (3.8c) i (3.8d).

$$N(f) = N_t(f) + N_s(f) + N_w(f) + N_{th}(f) \quad (3.7)$$

$$10\log N_t(f) = 17 - 30\log f \quad (3.8a)$$

$$10\log N_s(f) = 40 + 20(s - 0.5) + 26\log f - 60\log(f + 0.03) \quad (3.8b)$$

$$10\log N_w(f) = 50 + 7.5w^{1/2} + 20\log f - 40\log(f + 0.4) \quad (3.8c)$$

$$10\log N_{th}(f) = -15 + 20\log f \quad (3.8d)$$

U jednačinama (3.8b) i (3.8c) figurišu i promjenjive s i w koje predstavljaju količinu šuma koji proizvode plovila (na skali od 0 do 1) i brzinu vjetra u m/s, respektivno.

Važno je napomenuti da dominantni izvori šuma variraju zavisno od frekvencije:

- Na vrlo niskim frekvencijama dominira turbulencija
- Na niskim i srednjim frekvencijama dominiraju plovila
- Na visokim frekvencijama dominira šum vjetra (površinski talasi)
- Na vrlo visokim frekvencijama dominira termalni šum

Ova varijacija dominantnih izvora šuma sa frekvencijom značajno utiče na dizajn i performanse podvodnih akustičnih komunikacionih sistema.

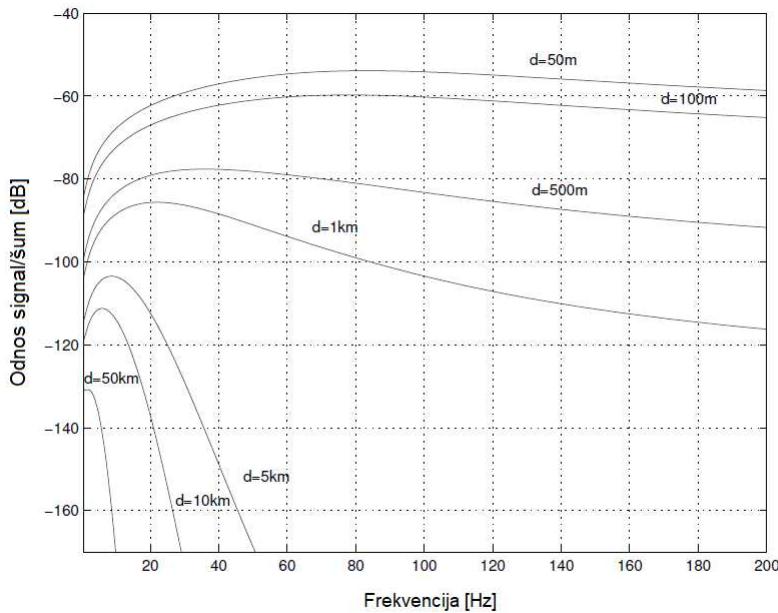
Intenzitet ambijentalnog šuma u podvodnom akustičnom kanalu opada sa porastom frekvencije, dok slabljenje signala raste. Ova kombinacija efekata dovodi do izražene frekvencijske zavisnosti odnosa signal/šum (SNR). Odnos signal/šum može značajno da varira za promjene frekvencije, što direktno utiče na propusni opseg kanala. Za fiksno rastojanje, odnos signal/šum zavisi od frekvencije prema sljedećoj jednačini:

$$SNR(l, f) = \frac{S_l(f)}{A(l, f) \cdot N(f)} \quad (3.9)$$

gdje je:

- $S_l(f)$ - spektralna gustina snage predajnog signala
- $A(l, f)$ - slabljenje koje zavisi od rastojanja l i frekvencije f
- $N(f)$ - spektralna gustina snage šuma

Sa slike 3.5 se jasno vidi zašto propusni opseg u podvodnom akustičnom kanalu zavisi od rastojanja. Za unaprijed definisanu vrijednost odnosa signal/šum, frekvencijski opseg je uvijek veći za manja rastojanja. Ovo je posljedica činjenice da slabljenje signala raste sa rastojanjem, što smanjuje upotrebljivi frekvencijski opseg na većim udaljenostima. Ova zavisnost propusnog opsega od rastojanja je ključna karakteristika podvodnih akustičnih kanala i značajno utiče na dizajn komunikacionih sistema i mreža u ovom okruženju. Na primjer, za postizanje iste brzine prenosa podataka, sistemi koji rade na većim udaljenostima moraju koristiti naprednije tehnike modulacije i kodiranja kako bi kompenzovali smanjen propusni opseg.



Slika 3.5: Odnos signal/šum u funkciji frekvencije za definisana propagaciona rastojanja.

3.2 Modelovanje podvodnog akustičnog kanala

3.2.1 Fizički kanal u DESERT simulatoru

Za potrebe istraživanja u ovom radu korišćeno je simulaciono okruženje DESERT, o kojem će detaljnije biti riječi u nastavku. Važno je napomenuti da je DESERT, iako specijalizovan za podvodne mreže, u suštini mrežni simulator koji ne interpretira sve smetnje na fizičkom kanalu. Simulator računa faktor propagacije kao slabljenje u odnosu na rastojanje koristeći Urick-Thorp formulu (3.5). Šum koji potiče od brodova, vjetra i termalnih izvora može se definisati kroz parametre u .tcl skripti, čime se uključuje u simulaciju [55].

Pored toga, DESERT simulator nudi različite modele interferencije koji kontrolišu odlučivanje o uspješnom prijemu paketa. Za potrebe ovog istraživanja, kao najprikladniji je odabran *MEANPOWER* model, koji će biti korišćen u svim simulacijama. Ovaj model funkcioniše na sljedeći način:

- Prijem prvog paketa se uzima kao referentni (multi) trenutak.
- Svaki naredni paket čija snaga prelazi određeni prag (koji je moguće podešavati) tretira se kao interferencija.
- U slučaju interferencije, prijem oba paketa - i originalnog i interferirajućeg - smatra se neuspješnim.

Važno je napomenuti da su svi modemi u DESERT simulatoru konfigurisani kao *half-duplex*, što znači da je nemoguća simultana transmisija i prijem signala na istom uređaju.

U prethodnom poglavlju matematički su opisani svi faktori koji utiču na prijem paketa. U DESERT simulatoru, odnos signal/šum (SINR - *Signal to Interference plus Noise Ratio*) računa se prema formuli (3.10):

$$SINR = \frac{P_{rx}}{P_n + P_i} \quad (3.10)$$

gdje je:

- P_{rx} - snaga pristiglog paketa na prijemu
- P_n - snaga šuma
- P_i - snaga interferencije

Za određenu modulaciju, iz SINR-a se može izračunati vjerovatnoća greške u prenosu

bitova (*Bit Error Rate* - BER). Koristeći BER, vjerovatnoća uspješnog prijema paketa (*Packet Delivery Ratio* - PDR) dobija se uvrštavanjem u jednačinu (3.11).

$$PDR = (1 - BER)^{n_bita} \quad (3.11)$$

Na osnovu gore navedenog, DESERT simulator odlučuje o uspješnosti prijema paketa. Dobra strana ovog pristupa je što je baziran na generalno prihvaćenom modelu i sumira sve glavne izvore smetnji, ali i dalje mu nedostaje vremenska varijabilnost kanala koja je izuzetno izražena u podvodnom okruženju. Dobija se konstantna vrijednost PDR-a, što može uticati da dobijeni rezultati ne budu približni realnom stanju (da budu mnogo bolji). Najjednostavniji način za modelovanje vremenske promjenljivosti kanala je podešavanje skripte koja bi mijenjala koeficijente šuma u određenim vremenskim trenucima u simulaciji. Drugi način je implementacija skrivenog Markovljevog modela (*Hidden Markov Model* - HMM) modela koji bi kontinualno simulirao stanje na kanalu.

3.2.2 HMM model kanala u DESERT simulatoru

Teorijska osnova HMM modela

Prvi korak u razumijevanju principa Hidden Markov modela (HMM) je shvatanje stohastičkih procesa. Stohastički proces predstavlja skup slučajnih promjenljivih koje opisuju evoluciju sistema kroz vrijeme. U kontekstu ovog rada, od posebnog interesa su diskretni stohastički procesi, gdje se promjene stanja dešavaju u tačno određenim vremenskim trenucima.

Jedan od najpoznatijih primjera diskretnog stohastičkog procesa je Markovljev lanac, koji je već pomenut u prvoj glavi u kontekstu implementacije algoritama pojačanog učenja. Ovdje se Markovljev lanac koristi za modelovanje kanala, i definiše se na osnovu dvije ključne pretpostavke:

1. **Markovljevo svojstvo:** Vjerovatnoća da će se sistem naći u određenom stanju u vremenskom trenutku t zavisi isključivo od stanja sistema u vremenskom trenutku $t - 1$. Ovo svojstvo definiše Markovljev proces prvog reda, odnosno homogeni Markovljev proces. Uopšteno, Markovljev proces k -toga reda bi podrazumijevao zavisnost budućeg stanja od $k + 1$ prethodnih stanja.
2. **Stacionarnost:** Statističke osobine sistema ne zavise od vremena.

HMM je statistički model koji proširuje koncept Markovljevog procesa uvođenjem skrivenih stanja. HMM je posebno koristan u situacijama gdje je potrebno modelovati sisteme koji se mogu naći u više stanja, pri čemu su sama stanja nevidljiva (nepoznata), dok su opažanja ili izlazi vidljivi.

HMM se sastoji od dva zasebna stohastička procesa:

1. Skriveni proces (nevidljiv posmatraču)
2. Vidljivi proces (opažanja)

Na osnovu promjena vidljivog procesa, HMM omogućava predviđanje promjena nevidljivog procesa. Važno je napomenuti da je skriveni proces takođe Markovljev lanac, što znači da buduće stanje zavisi samo od trenutnog.

Jednostavan primjer primjene HMM-a je predviđanje vremenskih prilika (nepoznatih) na osnovu odjeće koju neko nosi (vidljivo opažanje).

Interpretacija i implementacija u DESERT simulatoru

Postavlja se pitanje kako pomoću HMM modelovati podvodni akustični kanal. Kao što je već rečeno, podvodni akustični kanal je uslijed uticaja raznih faktora vremenski promjenjiv i kako bi rezultati dobijeni iz simulacija bili vjerodostojni potrebno je adekvatno modelovati tu njegovu karakteristiku. Radi jednostavnijeg razumijevanja koncepta, za početak će biti uzeta pretpostavka da kanal ima dva stanja – dobro i loše. Kada se kanal nađe u jednom od ovih stanja, u njemu će se zadržati određeni vremenski period. Govorimo o HMM-u jer su ova stanja skrivena – nisu poznata i definisana su kompleksnim parametrima opisanim u prethodnoj glavi. Povlačeći paralelu sa ranije navedenim primjerom o vremenu i oblačenju – pandan vremenu bi bilo stanje u podvodnom akustičnom kanalu, dok bi tip garderobe trebao da predstavlja neki parametar na osnovu kojeg je moguće zaključiti u kakvom je stanju kanal. Dakle, generalni pristup je uzeti realistična mjerena, naći parametar koji najbolje opisuje stanje kanala i iskoristiti ih kao osnovu za kreiranje HMM modela koji će vjerodostojno opisivati stanje na podvodnom akustičnom kanalu kroz vrijeme.

Prvo pitanje koje se nameće jeste izvor podataka koji će poslužiti za kreiranje HMM modela. Maja 2009. godine, naučnici sa univerziteta u Padovi i Haifi izvršili su niz mjerena u moru u luci Haifa i prikupljene podatke objedinili u ASUNA *dataset*, isprobavajući različite topologije [56]. Parametar od interesa bio je BER (Bit Error

Rate).

Dataset čini 6 $N \times N$ matrica (gdje je N broj primopredajnika) u obliku .mat fajlova, od kojih svaka sadrži diskretizovane vrijednosti BER-a između 2 primopredajnika. Konkretno, za ovaj rad korišćen je treći .mat fajl koji odgovara zvijezda topologiji za koju su analizirani protokoli dizajnirani. Svi fajlovi javno su dostupni na web stranici - <https://sites.google.com/marsci.haifa.ac.il/asuna/>.

Vrijednosti PER-a(*Packet Error Rate*) za definisana stanja dobijene obradom pomenutog fajla su:

- Dobro: $PER = 0.06$
- Srednje: $PER = 0.188$
- Loše: $PER = 0.406$

Sledeći korak je modelovanje linka podvodnog akustičnog kanala kao Markovljevog lanca sa tri stanja. Ako $Q_0, \dots, Q_n, \dots, Q_N$ označava sekvencu slučajnih pomjnjivih gdje Q_i predstavlja jedno od stanja, $P(Q_{n+1} = j|Q_n = i)$ je vjerovatnoća prelaska iz stanja i u stanje j u n -tom koraku. Glavna karakteristika Markovljevog lanca formulisana je u (3.12).

$$P(Q_{n+1} = i_{n+1}|Q_0 = i_0, \dots, Q_n = i_n) = P(Q_{n+1} = i_{n+1}|Q_n = i + n) \quad (3.12)$$

Jednačina (3.12) ukazuje da za poznato stanje $Q_n = i_n$, vjerovatnoća $P(Q_{n+1} = i_{n+1})$ ne zavisi od prethodnih stanja. Ovo dalje implicira da vjerovatnoće prelaska iz jednog u drugo stanje ne zavise od broja koraka (n) nego isključivo od stanja i i j . Za ovakav Markovljev lanac se kaže da je homogen i moguće je izračunati sve vjerovatnoće da će se sistem naći u određenom stanju u bilo kojem koraku polazeći samo od početnog stanja sistema i poznate matrice vjerovatnoća tranzicije, matematički prikazano u (3.13).

$$p_{i,j} = P(Q_{n+1} = j|Q_n = i), \forall n \quad (3.13)$$

Uzimajući u obzir činjenicu da se matrica tranzicija u koraku n dobija kao n -ti eksponent početne matrice vjerovatnoća, moguće je odrediti i matricu vjerovatnoća tranzicije u proizvoljnem vremenskom koraku t kao:

$$P(Q_{n+1} = j | Q_n = i) = (p^t)_{i,j}, \forall n \geq 0 \quad (3.14)$$

DESERT simulator koristi poseban modul za kreiranje HMM modela na osnovu ulaznih podataka. Ovaj modul je implementiran kao C++ klasa pod nazivom UW/HMMPHYSICAL. Pri konfiguraciji simulacije u .tcl fajlu, umjesto standardnog UW/PHYSICAL modula, koristi se jedan od sljedećih:

- UW/HMMPHYSICAL - za HMM model sa 2 stanja
- UW/HMMPHYSICAL/EXTENDED - za HMM model sa 3 stanja

DESERT simulator koristi modul UWHMMPHYSICAL/MCLINK za vezu između mrežnih elemenata. Ovaj modul je implementiran kroz klasu McLink, čiji konstruktor zahtijeva 14 parametara (od kojih je potrebno unijeti 11, dok ostale modul računa samostalno). Ključni parametri su:

Tabela 3.3: Ključni parametri McLink konstruktora.

| Parametar | Opis |
|-----------------------|--|
| p_succ_good | Vjerovatnoća uspješnog prenosa u dobrom stanju |
| p_succ_medium | Vjerovatnoća uspješnog prenosa u srednjem stanju |
| p_succ_bad | Vjerovatnoća uspješnog prenosa u lošem stanju |
| p_gb | Vjerovatnoća prelaska iz dobrog u loše stanje |
| p_gm | Vjerovatnoća prelaska iz dobrog u srednje stanje |
| p_mg | Vjerovatnoća prelaska iz srednjeg u dobro stanje |
| p_mb | Vjerovatnoća prelaska iz srednjeg u loše stanje |
| p_bg | Vjerovatnoća prelaska iz lošeg u dobro stanje |
| p_bm | Vjerovatnoća prelaska iz lošeg u srednje stanje |
| $state_change_step$ | Interval promjene stanja |
| $initial_state$ | Početno stanje sistema |

Ovi parametri omogućavaju precizno definisanje karakteristika HMM modela i ponašanja podvodnog akustičnog kanala u simulaciji.

Pored navedenih parametara, postoje i oni koji se računaju automatski. To su vjerovatnoće ostanka u istom stanju:

- p_gg - vjerovatnoća ostanka u dobrom stanju
- p_mm - vjerovatnoća ostanka u srednjem stanju
- p_bb - vjerovatnoća ostanka u lošem stanju

Ovi parametri se računaju automatski, uzimajući u obzir da je zbir vjerovatnoća prelaska iz jednog stanja u sva moguća stanja (uključujući i ostanak u istom stanju)

jednak 1. Na primjer:

$$p_{-gg} = 1 - (p_{-gb} + p_{-gm}) \quad (3.15)$$

Važno je napomenuti da kreirani link nije *duplex*, već ima jasno definisanu predajnu i prijemnu stranu. Ova karakteristika omogućava da se između dva mrežna elementa mogu definisati linkovi sa različitim faktorima vremenske varijabilnosti kanala u svakom smjeru. To znači da se mogu simulirati asimetrične komunikacione veze, gdje kvalitet prenosa može biti različit u zavisnosti od smjera komunikacije.

Ovakva fleksibilnost u definisanju karakteristika linka omogućava realističnije modelovanje podvodnih akustičnih kanala, uzimajući u obzir njihovu inherentnu varijabilnost i potencijalnu asimetriju u različitim smjerovima komunikacije.

Bitno je napomenuti da UW/HMMPHYSICAL klasa nasleđuje UW/PHYSICAL klasu, čime zadržava sve njene metode. Modifikacija koju uvodi UW/HMMPHYSICAL odnosi se isključivo na dodavanje faktora u proizvod pri računanju vjerovatnoće uspješnog prijema paketa. Umjesto da se razmatra interferencija, uz BER baziran na rastojanju između predajnika i prijemnika (*range-based* BER), uvodi se dodatni faktor P_{succ_HMM} . Stoga se vjerovatnoća uspješnog prijema paketa dobija prema formuli:

$$P_{succ} = P_{succ_HMM} \cdot P_{succ_default} \quad (3.16)$$

gdje je:

- P_{succ} - vjerovatnoća uspješnog prijema paketa
- P_{succ_HMM} - vjerovatnoća uspješnog prijema prema HMM modelu
- $P_{succ_default}$ - vjerovatnoća uspješnog prijema paketa dobijena na osnovu osnovnog modela fizičkog kanala u DESERT simulatoru (baziranom na slabljenju u odnosu na distancu)

Vjerovatnoće koje se prosleđuju konstruktoru dobijaju se analizom vrijednosti BER-a iz .mat fajlova ASUNA baze podataka, odnosno prebrojavanjem tranzicija između stanja. Na primjer, ako se sistem u dobrom stanju našao N_G puta, a prešao iz dobrog u loše N_{GB} puta, vjerovatnoća p_{gb} se računa prema formuli:

$$p_{gb} = \frac{N_{GB}}{N_G} \quad (3.17)$$

gdje je:

- p_{gb} - vjerovatnoća prelaska iz dobrog u loše stanje
- N_{GB} - broj prelazaka iz dobrog u loše stanje
- N_G - ukupan broj pojavljivanja sistema u dobrom stanju

Ovaj pristup omogućava precizno modelovanje dinamike podvodnog akustičnog kanala, uzimajući u obzir kako faktore specifične za HMM model, tako i uticaje interferencije bazirane na rastojanju. Time se postiže realističnija simulacija ponašanja kanala u različitim uslovima.

Glava 4

UW-ALOHA-Q

U ovom poglavlju biće dat kratak pregled UW-ALOHA-Q protokola koji je detaljno opisan u [5]. Ovaj protokol predstavlja ključnu polaznu tačku za dalje modifikacije i poređenja koja će biti predmet ovog rada. UW-ALOHA-Q je adaptacija ALOHA-Q protokola za podvodno okruženje, dizajniran da odgovori na jedinstvene izazove podvodnih akustičnih komunikacija. Protokol se zasniva na principima pojačanog učenja, što mu omogućava prilagođavanje dinamičnoj prirodi podvodnog kanala. Razumijevanje UW-ALOHA-Q protokola je od suštinskog značaja za ovo istraživanje iz sljedećih razloga:

- Omogućava identifikaciju područja za potencijalna poboljšanja RL-baziranih MAC protokola u podvodnom okruženju
- Pruža osnovu za razvoj modifikacija koje će unaprijediti performanse protokola
- Služi kao referentna tačka za poređenje sa drugim pristupima u MAC protokolima za podvodne akustične mreže

U narednim sekcijama biće analizirane komponente UW-ALOHA-Q protokola, počevši od njegovog prethodnika, ALOHA-Q protokola, koji je originalno razvijen za nadzemne mreže. Posebna pažnja biće posvećena adaptacijama neophodnim za primjenu u podvodnom okruženju, kao i prednostima i ograničenjima ovog pristupa.

4.1 ALOHA-Q

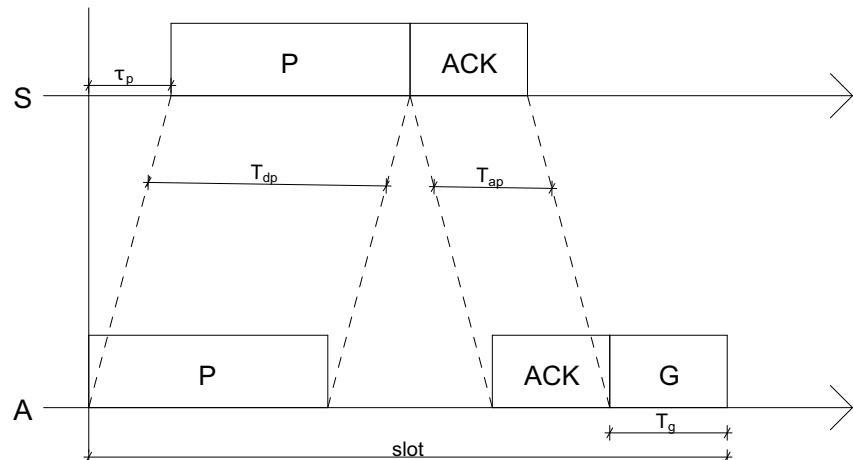
ALOHA-Q [36] predstavlja inovativni protokol baziran na pojačanom učenju, originalno dizajniran za primjenu u nadzemnim bežičnim mrežama. Ovaj proto-

kol kombinuje principe klasičnog ALOHA pristupa sa tehnikama mašinskog učenja, uvodeći koncept vremenskih slotova za efikasniju komunikaciju.

Za razliku od osnovnog ALOHA protokola, ALOHA-Q dijeli vrijeme na diskretne slotove, čime se smanjuje vjerovatnoća kolizije paketa. Protokol je dizajniran za mrežnu topologiju u kojoj više agenata (čvorova) šalje pakete podataka jednom zajedničkom prijemniku. Nakon slanja paketa, mrežni čvor koji koristi ALOHA-Q protokol čeka potvrdu prijema (ACK). Ukoliko potvrdu ne dobije u okviru tekućeg slot-a, prenos se smatra neuspješnim.

Trajanje slot-a (prikazanog na slici 4.1) je prilagođeno tako da uvijek bude dovoljno dugačko da obuhvati vrijeme prenosa paketa podataka - T_{dp} , dva vremena propagacije - τ_p , i vrijeme prenosa potvrde (*Acknowledgement* - ACK) - T_{ap} . Ova fleksibilnost u dizajnu slotova omogućava protokolu da se prilagodi različitim mrežnim uslovima i zahtjevima.

Jedna od ključnih karakteristika ALOHA-Q protokola je njegova distribuirana priroda. Svaki agent u mreži djeluje nezavisno, donoseći odluke o prenosu na osnovu vlastitog iskustva i učenja, bez potrebe za centralnom koordinacijom. Ova samostalnost u učenju znači da agenti ne zahtijevaju eksterne informacije o stanju mreže, što ALOHA-Q čini posebno pogodnim za adaptaciju u kompleksna okruženja. Upravo ova nezavisnost agenata i odsustvo potrebe za eksternim informacijama o mreži čini ALOHA-Q protokol posebno atraktivnim za prilagođavanje podvodnom okruženju. U takvim uslovima, gdje je prikupljanje globalnih informacija o stanju mreže izazovno zbog velikih kašnjenja i nepouzdanosti kanala, sposobnost agenata da samostalno uče i optimizuju svoje ponašanje predstavlja značajnu prednost.



Slika 4.1: Struktura slot-a ALOHA-Q protokola.

Frejm kod ALOHA-Q protokola je podijeljen na određen broj slotova, a akcija za agenta predstavlja izbor slota za prenos paketa. Agent bira odgovarajuću akciju na osnovu sopstvene (u ovom slučaju jednodimenzionalne) Q-tabele čiji se broj kolona se poklapa sa brojem slotova u frejmu. U početnom trenutku sve vrijednosti u Q-tabeli su postavljene na 0. Agent na početku svakog frejma poredi vrijednosti iz Q-tabele i za prenos bira slot sa najvećom Q vrijednosti. Ako postoji više maksimuma, agent nasumično bira između njih. Sistem nagrada u ALOHA-Q protokolu je binaran. Za svaki izabrani slot, agent dobija nagradu 1 ako uspješno primi ACK u tom istom slotu, ili nagradu 0 ako ACK izostane ili stigne u nekom drugom slotu. Nakon obračuna nagrade, agent ažurira odgovarajuće polje u Q-tabeli prema formuli:

$$Q_{t+1}(k) = Q_t(k) + \alpha(r - Q_t(k)) \quad (4.1)$$

gdje je:

- $Q_t(k)$ - vrijednost u Q-tabeli za slot k u trenutku (frejmu) t
- $Q_{t+1}(k)$ - nova vrijednost u Q-tabeli za slot k nakon ažuriranja
- α - stopa učenja (*learning rate*), koja kontroliše brzinu ažuriranja Q-vrijednosti (u osnovnoj verziji ALOHA-Q protokola uzima se $\alpha = 0.1$)
- r - numerička vrijednost nagrade (1 za uspješan prenos, 0 za neuspješan)

Distribuirana priroda ALOHA-Q protokola i njegova sposobnost prilagođavanja dinamičnim promjenama kanala čine ga potencijalno pogodnim za primjenu u podvodnom okruženju. Istraživanje predstavljeno u [37] potvrđuje ovu prepostavku, demonstrirajući funkcionalnost ALOHA-Q protokola u podvodnim uslovima. Međutim, kao što je očekivano, protokol pokazuje znatno lošije performanse u poređenju sa implementacijom u nadzemnim mrežama.

Za prilagođavanje podvodnom okruženju, ključne modifikacije su izvršene na dva parametra: brzina prenosa paketa i trajanje slotova. Ove promjene su neophodne kako bi se kompenzovao uticaj značajnog propagacionog kašnjenja karakterističnog za podvodne akustične kanale. Trajanje slotova se računa prema formuli:

$$T_s = (T_{dp} + T_{ap} + T_g) + 2\tau_p \quad (4.2)$$

gdje je T_s ukupno trajanje slotova, a T_g trajanje zaštitnog (*guard*) intervala.

Protokol primjenjuje *stateless Q-učenje*, jer agenti nisu podložni promjeni stanja. Takođe, svaki agent rješava *N-armed-bandit* problem u smislu biranja najpogodnijeg slota za prenos, uvijek se vodeći pohlepnom politikom; agent nikada neće promijeniti slot za slanje paketa ako je prenos uspješan u svrhu istraživanja mogućnosti u drugim slotovima. Ovo je uslovljeno binarnim vrijednostima nagrada. Agenti operišu u multi-agentnom sistemu sa ciljem povećanja kumulativnog protoka, ali nisu svjesni jedni drugih i svaki agent ostale posmatra kao sastavni dio okruženja.

Značajan zaključak iz [37] je da sinhronizovani ALOHA-Q protokol ne donosi poboljšanja performansi u podvodnom okruženju. Ova činjenica će imati važnu ulogu u daljoj adaptaciji protokola za podvodne akustične mreže.

4.2 UW-ALOHA-Q

Iako je demonstrirana mogućnost funkcionisanja ALOHA-Q protokola u podvodnom okruženju, analiza njegovih performansi ukazala je na značajan prostor za poboljšanja. Kao odgovor na specifične izazove podvodnih akustičnih mreža, razvijen je UW-ALOHA-Q protokol, predstavljajući adaptaciju originalnog ALOHA-Q za podvodne akustične mreže.

U radu [5], autori su identifikovali i implementirali tri ključne modifikacije koje čine osnovu UW-ALOHA-Q protokola:

1. Uvođenje asinhronog pristupa
2. Optimizacija broja slotova
3. Implementacija *random backoff* mehanizma

Ove adaptacije su dizajnjirane da adresiraju jedinstvene karakteristike podvodnog akustičnog kanala, uključujući velika propagaciona kašnjenja, ograničeni propusni opseg i visoku varijabilnost uslova prenosa. Svaka od ovih modifikacija ima za cilj poboljšanje efikasnosti protokola u izazovnom podvodnom okruženju, istovremeno zadržavajući prednosti originalnog ALOHA-Q pristupa baziranog na pojačanom učenju.

U narednim sekcijama, detaljno je razmotrena svaka od ovih adaptacija, analizirajući njihov uticaj na performanse protokola i sposobnost UW-ALOHA-Q da se nosi sa specifičnim izazovima podvodnih akustičnih komunikacija.

4.2.1 Asinhronost

U nadzemnim bežičnim mrežama, sinhronizacija se često postiže korišćenjem GPS signala. Međutim, u podvodnom okruženju, GPS signal nije dostupan, što predstavlja značajan izazov za koordinaciju mrežnih čvorova. Tradicionalno, ovo bi zahtijevalo implementaciju složenih algoritama sinhronizacije, što dodatno opterećuje već ograničene resurse podvodnih mreža.

UW-ALOHA-Q protokol elegantno prevazilazi ovaj problem iskorištavanjem inherentnih karakteristika podvodnog akustičnog kanala - velikih propagacionih kašnjenja - u kombinaciji sa mehanizmom pojačanog učenja. Umjesto da se oslanja na preciznu sinhronizaciju, protokol prihvata asinhronost kao prednost. U asinhronom režimu rada, frejmovi različitih mrežnih čvorova počinju u različitim vremenskim trenucima. Kao rezultat toga, uz varijabilna propagaciona kašnjenja, paketi stižu do prijemnika nasumičnim redoslijedom. U slučaju kolizije, čvorovi ne dobijaju povratnu informaciju (ACK paket) o prijemu paketa. Izostanak ACK-a rezultira smanjenjem odgovarajuće vrijednosti u Q-tabeli čvora, što dalje vodi ka promjeni slota za slanje u narednom frejmu. S druge strane, čvorovi čiji su paketi uspješno primljeni nastavljaju koristiti isti slot u narednim frejmovima.

Ovaj proces se može posmatrati kao samo-organizujući sistem. Nakon određenog broja frejmova, čvorovi pronalaze optimalne slotove za slanje paketa koji su usklađeni sa asinhronim rasporedom početaka frejmova. Rezultat je stanje konvergencije mreže, gdje su kolizije minimizirane bez potrebe za eksternom sinhronizacijom ili centralizovanim entitetom za koordinaciju.

Ashronost u UW-ALOHA-Q protokolu donosi nekoliko ključnih prednosti. Prvo, eliminiše potrebu za kompleksnim algoritmima sinhronizacije. Drugo, smanjuje MAC zaglavljiva u komunikaciji. Treće, povećava robusnost u uslovima promjenljivih propagacionih kašnjenja. Konačno, poboljšava skalabilnost mreže, omogućavajući lakše dodavanje novih čvorova bez potrebe za rekonfiguracijom cijelog sistema.

4.2.2 Smanjenje broja slotova

Trajanje slot-a u podvodnom okruženju, računato prema jednačini (4.2), znatno je veće nego u nadzemnim mrežama zbog velikog propagacionog kašnjenja. Ova karakteristika podvodnog akustičnog kanala otvara mogućnost za značajnu optimizaciju protokola. Ključna ideja iza ove adaptacije je sljedeća: za vrijeme koje je potrebno poslatom paketu da putuje fizičkim kanalom, potencijalno je moguće generisati i po-

slati više paketa. Konkretno, u slučaju dovoljne distance između mrežnih čvorova, unutar jednog slota moguće je poslati dva ili više paketa koji neće interferirati na prijemniku. Ova opservacija vodi ka drugoj važnoj adaptaciji ALOHA-Q protokola za podvodno okruženje - smanjenju broja slotova.

Iako je ova optimizacija teoretski moguća i u sinhronizovanim mrežama, asinhronost UW-ALOHA-Q protokola značajno olakšava njenu implementaciju. Asinhronost, u kombinaciji sa *random backoff* mehanizmom koji prilagođava početke frejmova, pomaže u stvaranju situacija gdje se paketi različitih čvorova mogu efikasno rasporediti unutar smanjenog broja slotova bez kolizija.

Za kvantifikaciju ove adaptacije, uveden je parametar B , definisan kao:

$$B = \frac{S \cdot (2 \cdot \tau_p + T_{dp})}{N \cdot T_{dp}} \quad (4.3)$$

gdje S predstavlja broj slotova, a N broj čvorova u mreži. Fizički, B predstavlja odnos između trajanja frejma i vremena potrebnog da se pošalju svi paketi u frejmu, i direktno je proporcionalan broju slotova.

Izbor vrijednosti B predstavlja kompromis između dva važna faktora:

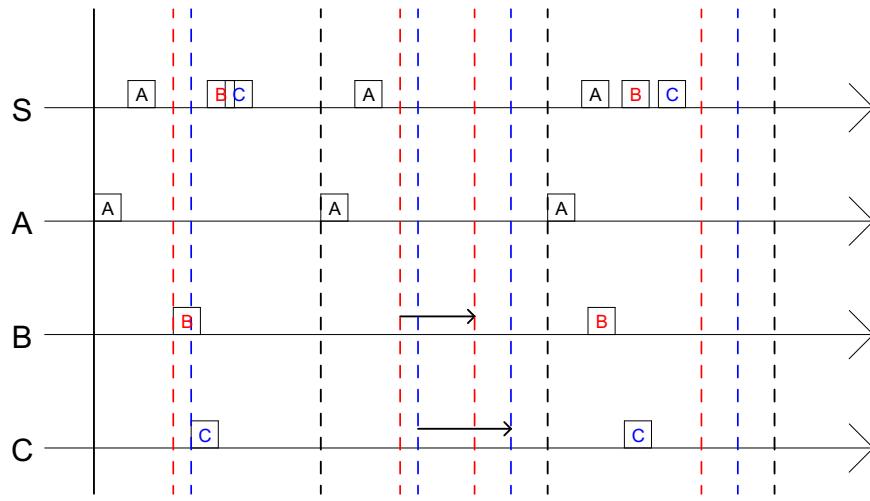
1. Veći *index B* (više slotova u frejmu) pruža više prostora mrežnim čvorovima za slanje paketa bez kolizija, ali rezultira lošijom iskorišćenošću kanala.
2. Manji *index B* (manje slotova u frejmu) teoretski povećava iskorišćenost kanala, ali otežava proces konvergencije mreže.

Nakon opsežne analize, autori u [5] zaključuju da se optimalne performanse postižu kada je $B = 1.5$. Ova vrijednost predstavlja balans između efikasne iskorišćenosti kanala i stabilne konvergencije mreže.

4.2.3 Random Backoff

Asinhronost i smanjenje broja slotova, iako potencijalno povećavaju iskorišćenost kanala, mogu otežati proces konvergencije mreže. Kako bi se ublažio ovaj negativan uticaj i poboljšale ukupne performanse protokola, UW-ALOHA-Q uvodi modifikovani *uniform-random-backoff* mehanizam. U tradicionalnim komunikacionim mrežama, *backoff* se često implementira kao period čekanja prije ponovnog pokušaja transmisije, pri čemu se dužina čekanja računa kao umnožak broja slotova koji eksponencijalno raste sa brojem uzastopnih neuspješnih transmisija. Međutim, direk-

na primjena ovog pristupa u UW-ALOHA-Q protokolu ne bi bila optimalna. Zbog smanjenog broja slotova i fiksiranog početka frejma, postoji rizik da čvorovi ne mogu pronaći odgovarajući slot za transmisiju uslijed nepovoljnog rasporeda početaka frejmova. Ovo bi moglo dovesti do nemogućnosti konvergencije mreže. Zbog toga, predložen je novi pristup, takav da poslije svakih X uzastopno neuspješnih transmisija čvor nasumično pomjera početak frejma nezavisno od procesa učenja. Na ovaj način, čvorovi mogu da izmjene nepovoljnu konfiguraciju frejmova koja sprječava mrežu da konvergira.



Slika 4.2: Princip funkcionisanja UW-ALOHA-Q protokola.

Na slici 4.2 prikazane su sve tri opisane specifičnosti UW-ALOHA-Q protokola. Primjećuje se da frejmovi svih agenata u mreži počinju u različitim trenucima (označeni su različitim bojama). Frejm je podijeljen na 2 slota jednakog trajanja iako mrežu čine 3 čvora. Prepostavlja se da su u prvom frejmu svi agenti za prenos nasumično izabrali prvi slot. Mrežni čvor A je uspješno poslao paket, dok je na prijemniku došlo do kolizije između paketa poslatih od strane agenata B i C. Uslijed izostanka paketa potvrde, agenti B i C aktiviraju *backoff* mehanizam i nasumično pomjeraju vremena početka frejmova. Takođe, s obzirom da su im vrijednosti u Q-tabelema koje odgovaraju prvom slotu smanjene (i iznose -0.1), za prenos biraju jedini preostali - drugi slot. Sa slike se uočava da u drugom frejmu sva 3 agenta neometano šalju pakete i može se zaključiti da je mreža u stanju konvergencije.

Bitno je napomenuti da u predloženoj verziji UW-ALOHA-Q protokola, prijemnik i mrežni čvorovi koriste frekvencijski odvojene kanale za slanje paketa podataka i potvrda prijema. Konkretno, mrežni čvorovi šalju pakete podataka na jednom frekvencijskom kanalu, dok prijemnik šalje potvrde prijema (ACK) na drugom. Ovakva

frekvencijska separacija eliminiše mogućnost kolizije između paketa podataka i potvrda prijema.

4.3 Implementacija UW-ALOHA-Q protokola u DESERT simulatoru

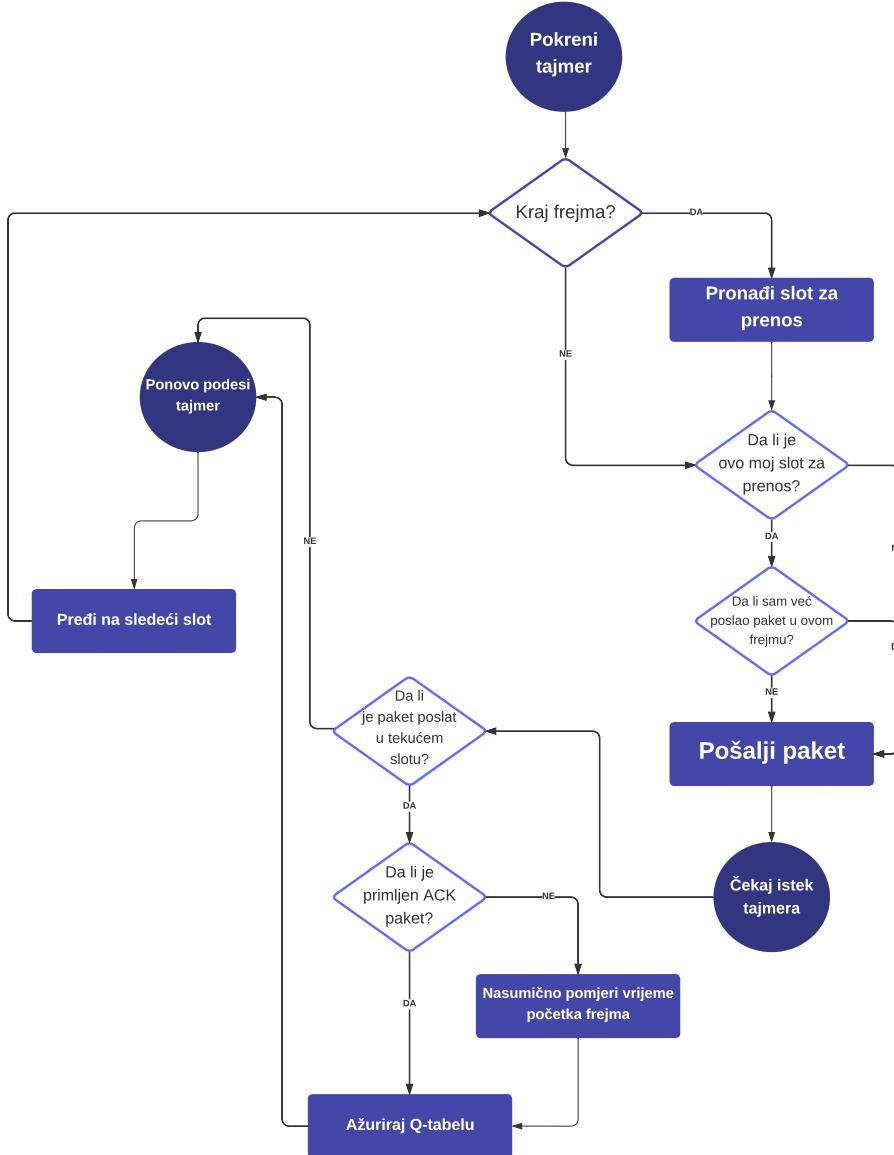
DESERT (*DEsign, Simulate, Emulate and Realize Test-beds for Underwater network protocols*) predstavlja specijalizovani mrežni simulator dizajniran za podvodne akustične mreže. Ovaj simulator pruža robustno okruženje za testiranje i evaluaciju različitih protokola na nivou linka i mreže u realističnim uslovima podvodne komunikacije.

DESERT je implementiran u programskom jeziku C++, što omogućava efikasno izvršavanje i fleksibilnost u dizajnu protokola. Za konfiguraciju i povezivanje modula, simulator koristi TCL (*Tool Command Language*) skripte, što olakšava brzo prototipiranje i eksperimentisanje. Naslijedivši modularnost od ns-2 simulatora, DESERT omogućava laku integraciju novih protokola i modela. Posebno je prilagođen za simulaciju podvodnih akustičnih mreža, uključujući modeliranje specifičnih karakteristika podvodnog kanala.

Za implementaciju UW-ALOHA-Q protokola u DESERT simulatoru, kreirane su dvije ključne klase: jedna za mrežni čvor (agent) i druga za površinski prijemnik. Ove klase predstavljaju module koji se integrišu u DESERT okruženje putem .tcl skripti, omogućavajući detaljnu simulaciju ponašanja protokola u različitim mrežnim scenarijima.

4.3.1 Agenti

Ugrubo, logika funkcionisanja agenta algoritamski je prikazana na slici 4.3.

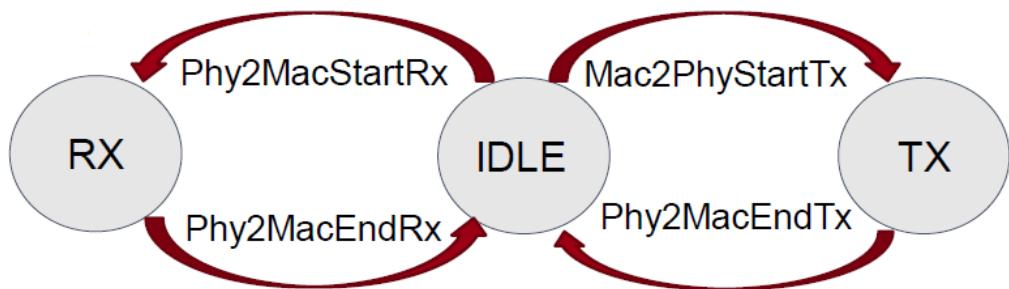


Slika 4.3: Logika implementirana u agentima UW-ALOHA-Q protokola.

Implementacija agenata UW-ALOHA-Q protokola u DESERT simulatoru definisana je u fajlovima *uw-aloha-q-node.cpp* i *uw-aloha-q-node.h*. Važno je napomenuti da integracija protokola u simulator zahtijeva dodatne korake pored kreiranja ovih fajlova. Detaljna dokumentacija o procesu integracije dostupna je na zvaničnom sajtu DESERT simulatora.

DESERT je *event-based* simulator, što znači da pokretanje određenih funkcija klase okida događaj, ili konkretno isticanje tajmera. Podešavanjem tajmera da se aktivira sinhronizovano sa počecima slotova u frejmu, mrežni čvorovi u tom trenutku (na početku slota) provjeravaju da li u dolazećem slotu treba da šalju paket i na

osnovu toga odlučuju o daljim akcijama. Bitno je napomenuti da je tajmer svakog mrežnog elementa nezavisan, tako da je moguće implementirati asinhronu operaciju protokola. Već je pomenuto da je komunikacija moguća samo u *half-duplex* modu, to jest da elementi mreže ne mogu simultano da šalju i primaju pakete. Kako bi se imao uvid u trenutno stanje mrežnog agenta, svaki od njih u sebi ima implementiran *state machine* (slika 4.4) koji predstavlja vid komunikacije između fizičkog i MAC nivoa o početku ili kraju prijema/transmisije paketa. Na ovaj način, fizički i MAC nivo su u svakom trenutku svjesni komunikacije koja se između njih odvija i neće dozvoliti da se paket šalje dok se drugi prima ili obrnuto. Kada se agent nalazi u neaktivnom (*idle*) stanju i fizički nivo detektuje da paket pristiže, obavještava nivo linka da je započeo prijem i automatski se poziva funkcija *Phy2MacStartRx* kroz koju se definišu radnje koje agent izvršava kada mu pristigne paket. Kada se prijem završi, poziva se funkcija *Phy2MacEndRx* kojom se konstatuje kraj prijema paketa i agent se vraća u neaktivno stanje. Već je pomenuto da su u DESERT simulatoru svi modemi *half-duplex* pa *state machine* služi i kao mehanizam da se nivou linka onemogući slanje paketa između pozivanja ove dvije funkcije. Isti mehanizam primjenjen je i pri slanju paketa, sa razlikom što nivo linka prvi obavještava fizički nivo da je transmisija počela. Odgovarajuće funkcije koje obavještavaju o početku i kraju prenosa su *Mac2PhyStartTx* i *Phy2MacEndTx*.



Slika 4.4: Princip komunikacije fizičkog nivoa i nivoa linka pri prijemu/slanju paketa.

Q-tabela je implementirana kao objekat klase *vector*. *Vector* je tip podatka u C++ programskom jeziku koji je jako sličan nizovima ali i mnogo fleksibilniji jer ne-ma ograničenje fiksнog broja elemenata. Za pravilno funkcionisanje UW-ALOHA-Q protokola pri instalaciji simulatora potrebno je uključiti *add-on-ove* pod nazivom *uwmulti-traffic-control* i *uwmulti-stack-controller* kroz koje je omogućeno razdvajanje dostupnog frekvenčnog opsega na 2 odvojena kanala kako bi se izbjegla kolizija paketa podataka koje šalju paketi sa ACK paketima koje šalje površinski prijemnik. Paketi se prema površinskom prijemniku šalju širim kanalom u odnosu na onaj ko-jim se šalju ACK paketi. Odnos širine kanala srazmjeran je odnosu veličina paketa podataka i ACK paketa.

4.3.2 Površinski prijemnik

Površinski prijemnik predstavlja ključnu komponentu u arhitekturi UW-ALOHA-Q protokola, iako njegova uloga u osnovnoj verziji protokola može djelovati jedno-stavna. U svojoj bazičnoj funkciji, površinski prijemnik obavlja sljedeće zadatke:

1. Prima pakete podataka od podvodnih agenata.
2. Provjerava integritet primljenih paketa.
3. Generiše i šalje ACK poruke kao potvrdu uspješnog prijema.

Nakon uspješnog prijema paketa, površinski prijemnik generiše ACK poruku koja sadrži destinacionu adresu agenta od kojeg je primio paket. Ova funkcionalnost je ključna za mehanizam učenja implementiran u agentima, jer omogućava agentima da ažuriraju svoje Q-tabele na osnovu uspješnosti transmisije.

Implementacija površinskog prijemnika u DESERT simulatoru definisana je u faj-lovima *uw-aloha-q-sink.cpp* i *uw-aloha-q-sink.h*. Kao i kod agenata, prijemnik koristi *event-driven* arhitekturu, reagujući na događaje kao što su prijem paketa ili istek određenih tajmera. Kompletan kod dostupan je na linku https://github.com/aleksaa13/DESERT_Underwater.

Glava 5

Predložene modifikacije UW-ALOHA-Q protokola

U ovoj glavi biće predstavljene predložene adaptacije UW-ALOHA-Q protokola s ciljem poboljšanja performansi u realističnom podvodnom okruženju. Razmatrano je više različitih adaptacija, sa fokusom na poboljšanje iskorišćenosti kanala, ali i optimizaciju troškova implementacije.

5.1 UW-ALOHA-Q sa modifikovanom *backoff* strategijom

Rezultati prikazani u [5] pokazuju da UW-ALOHA-Q ostvaruje odlične performanse u smislu iskorišćenosti kanala. Međutim, vjerodostojnost ovih rezultata se dovodi u pitanje zbog zanemarivanja ključnih izazova u podvodnom akustičnom kanalu. Vremenska varijabilnost i šumovi koji se javljaju na prenosnom medijumu su faktori čije zanemarivanje prilikom simulacija može dovesti do rezultata koji ne odražavaju realne performanse protokola u stvarnim uslovima.

Backoff mehanizam implementiran u [5] može negativno uticati na proces učenja i onemogućiti efikasno funkcionisanje protokola u slučaju nepovoljnog stanja na kanalu. Ovakav mehanizam bi funkcionsao u idealnim uslovima, kada bi jedini mogući razlog neuspješnog prenosa bila interferencija od paketa drugog mrežnog elementa. Međutim, u realnom podvodnom okruženju, situacija je znatno kompleksnija.

Razmatraju se dva scenarija:

1. **Loše početno stanje kanala:** U ovom slučaju, pomjeranje početka frejma pri svakoj neuspješnoj transmisiji (kojih bi bilo više nego uspješnih) uzrokovalo bi da mrežni čvorovi koji su našli odgovarajući slot za neometano slanje paketa brzo mijenjaju strategiju. Ovo bi bilo posljedica pojave interferencije sa čvorovima koji često mijenjaju slot zbog neuspješnih transmisija uzrokovanih lošim stanjem kanala. Za veće i gušće mreže, pretpostavka je da bi konvergencija u ovakvim uslovima bila praktično nemoguća.
2. **Narušavanje stanja konvergencije:** Pod pretpostavkom da je mreža u stanju konvergencije, a parametri kanala se naknadno pogoršaju, kontinuirano pomjeranje početka frejma mrežnih čvorova bi lako moglo narušiti to stanje konvergencije.

U cilju prevazilaženja prethodno opisanih problema, u ovom radu predlaže se novi *backoff* mehanizam za UW-ALOHA-Q protokol. Ključna inovacija ovog pristupa je aktiviranje pomjeranja početka frejma isključivo kada dođe do promjene favorizovanog slot-a, odnosno slot-a sa najvećom Q vrijednošću. Ovakav pristup značajno smanjuje rizik od situacija gdje bi gubici paketa uzrokovani nepovoljnim uslovima na kanalu doveli do učestalih nasumičnih pomjeranja početka frejma, što bi posljedično dodatno moglo izazvati kolizije.

Implementacija ovog mehanizma može se posmatrati kao svojevrsna zaštita stabilnosti protokola od negativnih uticaja šuma i drugih smetnji karakterističnih za podvodni akustični kanal. Čekanje na promjenu favorizovanog slot-a prije aktiviranja *backoff* mehanizma omogućava protokolu da bolje razlikuje stvarne kolizije od gubitaka paketa uzrokovanih nepovoljnim stanjem kanala.

U scenarijima gdje je stanje kanala loše, i dalje postoji značajna vjerovatnoća da će bar jedan prenos biti uspješan u toku više uzastopnih frejmova, što omogućava održavanje stabilnosti protokola. Međutim, ako se uspješan prenos ne ostvari duži period, senzorski čvor će procjeniti da postoji interferencija sa drugim čvorom i odlučiće se za promjenu slot-a i trenutka početka frejma. U takvoj situaciji, drugi čvor koji nije iskusio promjenu favorizovanog slot-a ostaće u svom trenutnom slotu, nastavljajući sa uspješnim prenosom ukoliko ne dođe do novih smetnji.

Važno je napomenuti da implementacija ovako modifikovanog *backoff* mehanizma može rezultirati smanjenom brzinom konvergencije u idealnim uslovima kanala. Međutim, očekivanje je da će u realističnom podvodnom okruženju, koje karakterišu brojni izazovi i smetnje, ovaj pristup nadmašiti performanse protokola sa originalnim

backoff mehanizmom. Ova pretpostavka bazira se na činjenici da novi mehanizam pruža bolju robusnost i adaptivnost u suočavanju sa nepredvidivim karakteristikama podvodnog akustičnog kanala.

5.2 UW-ALOHA-Q sa jednim kanalom i sinhronizacijom

Originalni UW-ALOHA-Q protokol koristi dva frekvencijski razdvojena kanala za prevenciju kolizija između paketa podataka koje šalju mrežni čvorovi i paketa potvrde koje šalje prijemna stanica na površini vode. Iako ova strategija značajno doprinosi bržoj konvergenciji protokola, njena praktična implementacija nailazi na ograničenja. Akustični modemi koji podržavaju ovakvu konfiguraciju su izuzetno rijetki ili neprihvatljivo skupi. U praksi dominiraju modemi koji koriste jedan frekvencijski kanal za *half-duplex* komunikaciju.

Uzimajući u obzir ova praktična ograničenja, u ovom poglavlju predlaže se modifikacija UW-ALOHA-Q protokola koja koristi jedan frekvencijski kanal za sve pakete u mreži, čime se značajno povećava njegova primjenjivost u realnim scenarijima. Kod ove adaptacije, fundamentalni koncept učenja ostaje nepromijenjen. Svi elementi mreže, izuzev prijemnika, zadržavaju Q-tabelu na osnovu koje biraju odgovarajući slot za transmisiju. Ključne izmjene se odnose na strukturu frejma.

Modifikovani frejm, prikazan na slici 5.1, podijeljen je na dva dijela. Prvi dio frejma sastoji se od N slotova smanjenog trajanja, gdje je N broj podvodnih mrežnih elemenata. Trajanje slot-a se računa prema formuli:

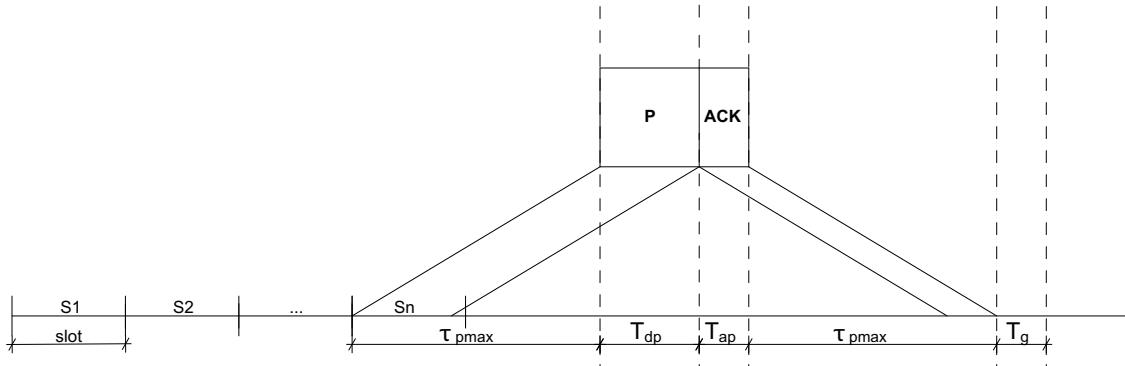
$$T_s = \gamma \cdot T_{dp} \quad (5.1)$$

gdje je $\gamma > 1$ parametar skaliranja koji balansira između efikasnosti iskorišćenja kanala i vjerovatnoće konvergencije. Veće γ produžava trajanje frejma, smanjujući iskorišćenost kanala, ali povećava šanse za konvergenciju pružajući agentima više prostora za neometano slanje paketa. Drugi dio frejma je rezervisan za zajednički ACK paket od prijemnika.

Protokol funkcioniše na sljedeći način: Na početku svakog frejma, agenti biraju jedan od slotova u prvom dijelu za slanje paketa podataka. Tokom prvog dijela frejma, mrežni čvorovi automatski odbacuju sve primljene pakete, dok prijemnik čeka

pakete podataka i bilježi adrese pošiljalaca uspješno primljenih paketa. U drugom dijelu frejma, prijemnik generiše zajednički ACK paket namijenjen svim mrežnim čvorovima i odbacuje sve primljene pakete, dok mrežni čvorovi prestaju sa slanjem i čekaju zajednički paket potvrde. Po prijemu ACK paketa, mrežni čvorovi provjeravaju da li se njihova adresa nalazi u tabeli uspješnih pošiljalaca. Na kraju frejma, prijemnik briše tabelu uspješnih pošiljalaca i vraća se u stanje prijema, dok mrežni čvorovi ažuriraju svoje Q-tabele i biraju slot za prenos u narednom frejmu.

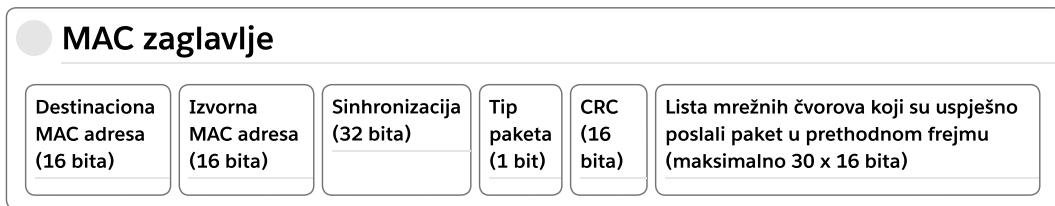
Ovakva struktura frejma eliminiše mogućnost kolizije između paketa podataka i ACK paketa (po cijenu slabije iskorišćenosti kanala) što se u originalnom UW-ALOHA-Q postizalo frekvencijskim razdvajanjem kanala. Time se postiže robusnost protokola uz istovremeno povećanje njegove praktične primjenjivosti u realnim podvodnim akustičnim mrežama.



Slika 5.1: Struktura frejma sinhronizovanog UW-ALOHA-Q protokola.

Osim izmijenjene strukture frejma, za ovu adaptaciju protokola karakterističan je drugačiji format paketa potvrde (ACK). Za razliku od standardnog ACK paketa koji koristi UW-ALOHA-Q i sadrži samo adrese pošiljaoca i primaoca, novi zajednički ACK paket sadrži spisak adresa svih mrežnih čvorova čiji je paket uspješno primljen u tekućem frejmu. Struktura ovog paketa prikazana je na slici 5.2.

U implementaciji za DESERT simulator, adrese su predstavljene brojevima radi jednostavnosti. U realnom scenariju, ove adrese bi bile MAC adrese ili numerički identifikatori mrežnih čvorova koji bi se slali zajedno sa paketima podataka. Važno je napomenuti da se ovi ACK paketi uvijek šalju na *broadcast* adresu, osiguravajući da svi čvorovi u mreži prime informaciju o uspješnim transmisijama.



Slika 5.2: Struktura ACK paketa kod sinhronizovanog UW-ALOHA-Q protokola.

Kako bi se osigurao robusniji proces učenja u uslovima potencijalnih gubitaka paketa pri prenosu kanalom, uvedeno je dodatno ograničenje: agenti ažuriraju svoju Q-tabelu samo u slučaju kada prime ACK poruku. U suprotnom, frejm se smatra nevalidnim i Q-tabele senzorskih čvorova se ne ažuriraju. Ova mjera štiti protokol od nepotrebnih fluktuacija u Q-vrijednostima uslijed privremenih nepovoljnih uslova na kanalu.

Predložena struktura frejma zahtijeva preciznu sinhronizaciju kako bi svi elementi mreže, uključujući i prijemnik, simultano mijenjali stanja i imali jednaku percepciju početka drugog dijela frejma. Ova sinhronizacija je ključna za efikasno funkcionisanje protokola, osiguravajući da se transmisija podataka i slanje ACK paketa odvijaju u jasno definisanim vremenskim okvirima. Zbog ovog sinhronizovanog pristupa, uvođenje *backoff* mehanizma, koji je karakterističan za mnoge MAC protokole, gubi smisao u kontekstu ove modifikacije UW-ALOHA-Q protokola. Umjesto toga, protokol se oslanja na precizno tempiranje i koordinisane akcije svih mrežnih elemenata.

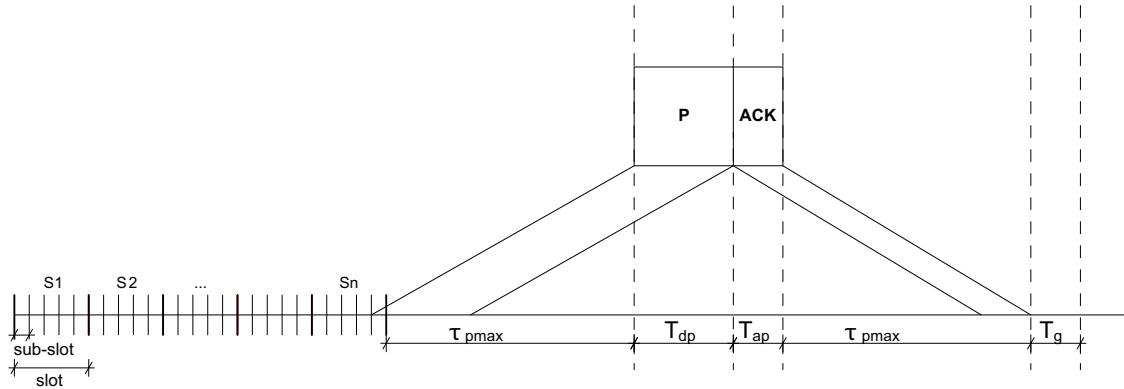
Iako eliminacija *backoff* mehanizma može djelovati kao potencijalni nedostatak u scenarijima sa visokim stepenom kolizija, skraćeno trajanje frejma kompenzuje ovaj aspekt i ima pozitivan uticaj na ukupnu iskorišćenost kanala. Kraći frejmovi omogućavaju češće prilike za transmisiju, što potencijalno vodi ka bržoj konvergenciji Q-vrijednosti i efikasnijem iskorištenju dostupnog propusnog opsega. Međutim, optimalno balansiranje između trajanja frejma i efikasnosti protokola ostaje predmet daljeg istraživanja i fine optimizacije u različitim mrežnim scenarijima.

5.3 Sinhronizovani *sub-slotted* UW-ALOHA-Q

U ovom poglavlju predložena je još jedna adaptacija UW-ALOHA-Q protokola koja uvodi koncept pod-slotova, dodatno unapređujući fleksibilnost i efikasnost si-

stema. Ova modifikacija nadograđuje prethodno opisani jednokanalni sinhronizovani UW-ALOHA-Q, dodajući novu dimenziju u procesu odabira vremena transmisije.

Ključna inovacija ove adaptacije je podjela svakog slota na određeni broj pod-slotova. Frejm zadržava osnovnu strukturu jednokanalnog sinhronizovanog UW-ALOHA-Q, ali sa dodatnom granularnošću unutar svakog slota, kao što je prikazano na slici 5.3.



Slika 5.3: Struktura frejma sub-slotted sinhronizovanog UW-ALOHA-Q protokola.

U ovoj konfiguraciji, agent ne bira samo slot, već i specifični pod-slot unutar tog slota za slanje paketa. Ova fina granulacija omogućava agentima preciznije podešavanje vremena transmisije, što potencijalno vodi ka boljoj iskorišćenosti kanala i smanjenju kolizija.

Uvođenjem pod-slotova povećava se fleksibilnost sistema, dajući agentima veći broj opcija za tempiranje svojih transmisija. Na ovaj način omogućen je napredniji oblik adaptacije, kompenzujući nedostatak *uniform-random-backoff* mehanizma. U situacijama gdje konvergencija nije moguća zbog nepovoljnog položaja čvorova ili nedovoljne velicine slota, odabir odgovarajućih pod-slotova može omogućiti pronađenje optimalne strategije.

Sa uvođenjem pod-slotova, Q-tabela postaje dvodimenzionalna. Ažuriranje Q-vrijednosti sada se vrši prema formuli:

$$Q_{t+1}(i, j) = Q_t(i, j) + a(r - Q_t(i, j)) \quad (5.2)$$

gdje je i indeks izabranog slota, a j indeks izabranog pod-slota. Ova dvodimenzionalna struktura Q-tabele omogućava agentima da uče i optimizuju svoje odluke

ne samo na nivou slot-a, već i na nivou pod-slot-a, što potencijalno vodi ka finijoj granulaciji u procesu učenja i adaptacije.

Iako *sub-slotted* pristup obećava značajna poboljšanja, on takođe uvodi nove izazove. Povećana kompleksnost procesa učenja zbog proširenog prostora akcija može rezultirati dužim vremenom konvergencije. Dodatno, postoji potreba za preciznjom sinhronizacijom na nivou pod-slotova. Ovi izazovi otvaraju nova područja za istraživanje i optimizaciju, uključujući implementaciju naprednih strategija eksploracije kod algoritma pojačanog učenja, kao i metoda za ubrzavanje procesa konvergencije u proširenom prostoru akcija.

Glava 6

Analiza performansi

U ovom poglavlju predstavljeni su rezultati opsežnih simulacija sprovedenih korišćenjem DESERT simulatora. Cilj ovih simulacija je evaluacija performansi originalnog UW-ALOHA-Q protokola, kao i njegovih modifikacija predloženih u prethodnom poglavlju. Dodatno, izvršeno je poređenje sa konvencionalnim TDMA i ALOHA-CS protokolima, koji ne koriste prednosti mašinskog učenja, kako bi se stekao sveobuhvatan uvid u efikasnost predloženih rješenja.

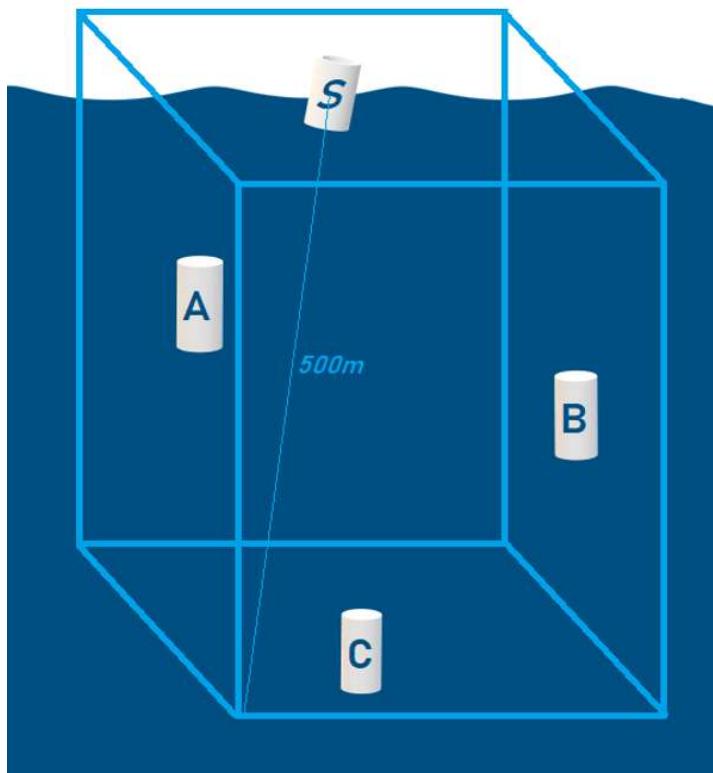
Za potrebe ove studije, simulirani su sljedeći protokoli:

- UW-ALOHA-Q: Originalni UW-ALOHA-Q protokol;
- UW-ALOHA-Q-B: UW-ALOHA-Q sa novom *backoff* strategijom (predstavljen u Sekciji 5.1);
- UW-ALOHA-Q-SC: Jednokanalni sinhronizovani UW-ALOHA-Q (predstavljen u Sekciji 5.2);
- UW-ALOHA-Q-SS: Sinhronizovani *sub-slotted* UW-ALOHA-Q (predstavljen u Sekciji 5.3);
- TDMA: Konvencionalni *Time Division Multiple Access* protokol;
- ALOHA-CS: ALOHA protokol koji primjenjuje tehniku osluškivanja kanala (*Carrier Sensing*).

Ključne metrike koje su razmatrane u ovoj studiji su iskorišćenost kanala, energetska efikasnost i brzina konvergencije u slučaju UW-ALOHA-Q protokola i njegovih varijanti.

6.1 Model sistema

Za potrebe evaluacije predloženih protokola, u DESERT simulatoru implementiran je realističan model podvodne akustične mreže. Korišćena je zvijezda topologija koja se sastoji od jednog *sink* čvora na površini vode i varijabilnog broja podvodnih mrežnih čvorova (agenata). Podvodni čvorovi su raspoređivani na nasumično odabranim pozicijama unutar definisanih granica, pri čemu je maksimalno rastojanje od *sink* čvora mijenjano u različitim simulacijama. Ilustracija ove topologije prikazana je na slici 6.1.



Slika 6.1: Topologija mreže

Parametri simulacije su pažljivo odabrani da reprezentuju realistične uslove u podvodnim akustičnim mrežama. Osnovni parametri, koji su zajednički za sve protokole, prikazani su u tabeli 6.1. Pored opštih parametara, za UW-ALOHA-Q protokol definisani su i specifični parametri prikazani u tabeli 6.2. Ovi parametri uključuju B od 1.5, veličinu ACK paketa od 20 bita i *guard* interval od 4 ms.

Tabela 6.1: Opšti parametri simulacija za sve protokole.

| Parametar | Vrijednost |
|---|------------------------------|
| Veličina paketa <i>Bitrate</i> | 1044 b (130.5 B) 9200 bps |
| Transmisiona snaga | 158 dBm |
| Prag prijema | 15 dBm |
| Period generisanja paketa <i>Learning rate</i> | 0.1 s 0.1 |
| Centralna frekvencija | 25000 Hz |
| Propusni opseg | 5000 Hz |
| Maksimalna udaljenost | 500m, 1000m, 1500m |
| Broj mrežnih čvorova | 5, 10, 15, 20, 25, 30 |

Tabela 6.2: Specifični parametri za UW-ALOHA-Q protokol.

| Parametar | Vrijednost |
|-----------------------|------------|
| B | 1.5 |
| Veličina ACK paketa | 20 b |
| <i>Guard</i> interval | 4 ms |

Trajanje slota kod UW-ALOHA-Q protokola računato je prema formuli (4.2), uzimajući u obzir definisano maksimalno rastojanje. S obzirom na to da rastojanje utiče na propagaciono kašnjenje, broj slotova u frejmu varira u zavisnosti od broja mrežnih elemenata i maksimalnog rastojanja, kao što je prikazano u tabeli 6.3. Ova varijabilnost u strukturi frejma omogućava protokolu da se prilagodi različitim konfiguracijama mreže, optimizujući iskorišćenje kanala u skladu sa specifičnim uslovima.

Tabela 6.3: Broj slotova u frejmu za različit broj podvodnih senzorskih čvorova i maksimalno rastojanje od *sink* čvora.

| Maks. rastojanje | Broj podvodnih senzorskih čvorova | | | | | |
|---------------------|-----------------------------------|----|----|----|----|----|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| 500 m | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1000 m | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 |
| 1500 m | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |

Kao glavni indikator performansi protokola analizirana je iskorišćenost kanala, koja je računata prema formuli (6.1). U ovoj formuli, R predstavlja broj uspješno primljenih paketa podataka, a T_{dp} vrijeme potrebno za prenos jednog paketa. Iskorišćenost kanala je izražena u Erlanzima, pri čemu 1 Erlang odgovara maksimalnom kapacitetu kanala. Ova metrika pruža jasan uvid u efikasnost protokola u iskorištavanju dostupnog propusnog opsega.

$$U = \frac{R \cdot T_{dp}}{\text{trajanje_simulacije}} \quad (6.1)$$

U dizajnu simulacija, posebna pažnja je posvećena osiguranju fer poređenja različitih protokola. Sve simulacije su konfigurisane tako da mrežni čvorovi pošalju približno isti broj paketa, tj. protekne isti broj frejmova za sve protokole. Ovo je posebno važno jer bi, u slučaju usklađivanja po vremenu trajanja, sinhronizovani UW-ALOHA-Q zbog skraćenog trajanja frejma imao priliku da pošalje značajno više paketa od regularnog UW-ALOHA-Q protokola. Takav pristup bi dao prednost sinhronizovanom protokolu u smislu šanse za konvergenciju.

6.2 Rezultati simulacija

U ovoj sekciji predstavljeni su rezultati simulacione analize UW-ALOHA-Q protokola i njegovih varijanti predloženih u ovom radu. Cilj ove analize je da se ispituju performanse ovih protokola i njihovo poređenje sa rešenjima koje ne koriste prednosti pojačanog mašinskog učenja.

U prvom dijelu, UW-ALOHA-Q protokol je upoređen sa klasičnim protokolima koji se dominantno koriste u podvodnim akustičnim senzorskim mrežama: TD-MA i ALOHA-CS. Ova komparativna analiza ima za cilj da istakne prednosti UW-ALOHA-Q protokola u pogledu iskorišćenosti kanala u izazovnom podvodnom okruženju.

Nakon toga, izvršeno je poređenje UW-ALOHA-Q protokola sa originalnim i predloženim *backoff* mehanizmima. *Backoff* mehanizmi igraju ključnu ulogu u rešavanju kolizija i poboljšanju efikasnosti protokola. Analizirane su različite varijante *backoff* mehanizama i njihov uticaj na performanse UW-ALOHA-Q protokola.

Zatim je fokus stavljen na predložene verzije UW-ALOHA-Q protokola koje koriste samo jedan frekventni kanal za prenos podataka i potvrda. Ova analiza ima za cilj da ispita mogućnosti optimizacije iskorišćenja kanala uz smanjenu kompleksnost sistema.

Na kraju, dat je osvrt na energetsku efikasnost analiziranih rešenja, koja je od ključnog značaja s obzirom na ograničene resurse i izazove u pogledu napajanja podvodnih senzorskih čvorova.

Tabela 6.4: Broj frejmova potreban da mreža uđe u stanje konvergencije kao funkcija broja čvorova u mreži.

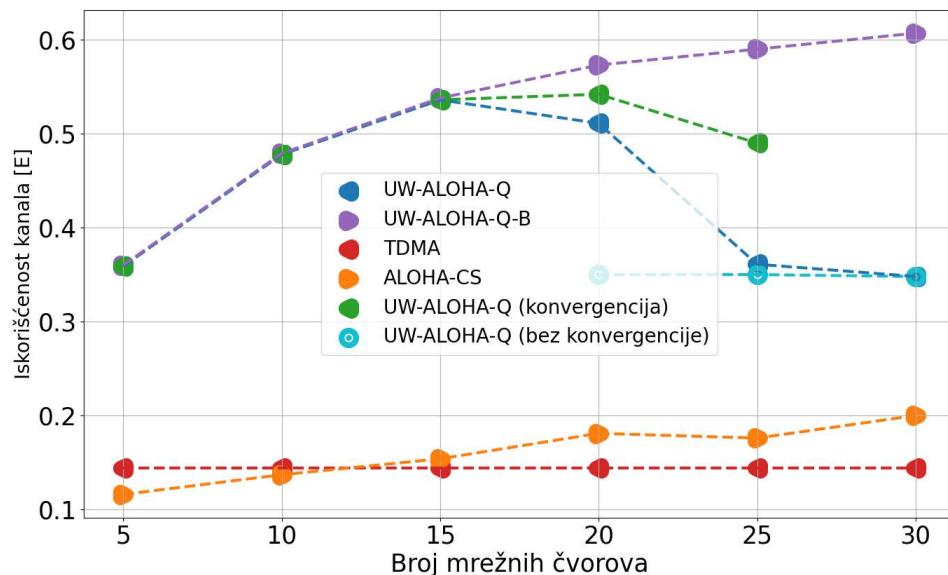
| protokol/broj nodova | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
|----------------------|----|----|-----|-----|-----|----|
| UW-ALOHA-Q | 12 | 41 | 61 | 134 | 277 | / |
| UW-ALOHA-Q-B | 19 | 42 | 103 | 205 | 515 | / |

6.2.1 Poređenje UW-ALOHA-Q sa TDMA i ALOHA-CS protokolima

U ovom poglavlju, upoređivaće se performanse UW-ALOHA-Q, UW-ALOHA-Q-B, TDMA i ALOHA-CS protokola u dva različita scenarija. U prvom scenariju koristiće se BER model u kojem figurišu rastojanje, veličina paketa i frekvencija (*range-based* BER), dok će drugi scenario podrazumijevati predloženi HMM model kanala.

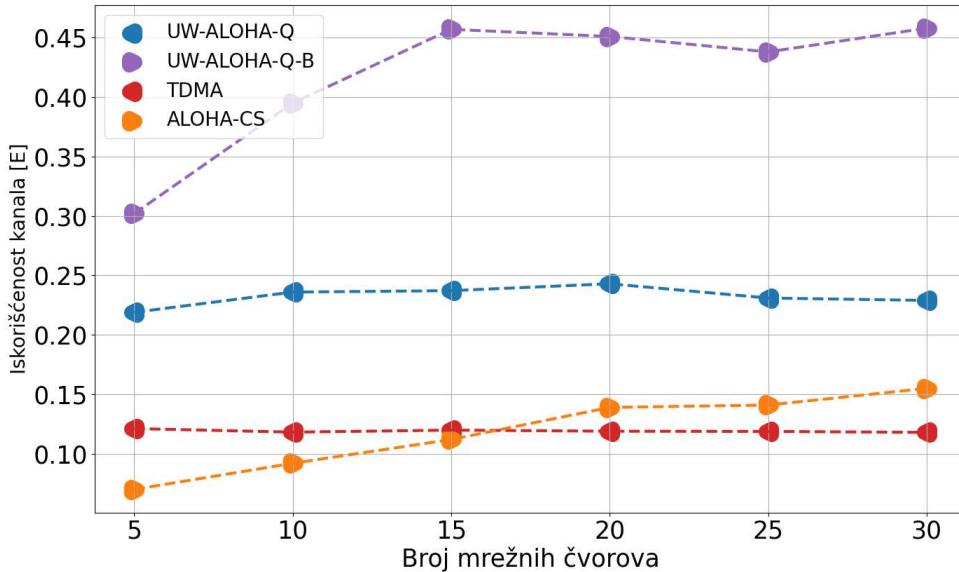
Slika 6.2 prikazuje iskorišćenost kanala pomenutih protokola kao funkciju broja mrežnih elemenata. Uočava se da su performanse UW-ALOHA-Q i UW-ALOHA-Q-B protokola superiorne u odnosu na postojeća rješenja.

Za mreže sa manjim brojem senzorskih čvorova UW-ALOHA-Q i UW-ALOHA-Q-B2 protokoli ispoljavaju slične performanse. Kako se broj mrežnih elemenata povećava, zbog nepovoljnog *backoff* mehanizma koji izaziva previše pomjeraja početaka frejmova i time spriječava mrežu da uđe u stanje konvergencije, performanse UW-ALOHA-Q protokola značajno trpe dok se kod UW-ALOHA-Q-B iskorišćenost kanala zadržava trend blagog porasta. Štaviše, UW-ALOHA-Q ne ulazi uvijek u stanje konvergencije za 20 ili više mrežnih elemenata. Generalno, postoji mogućnost da UW-ALOHA-Q u startu brže konvergira uslijed više mogućnosti za adaptaciju ali kada mrežni čvorovi nađu odgovarajuće slotove drastično se povećava mogućnost da se konvergencija naruši. To potvrđuju i rezultati prikazani u tabeli 6.4.



Slika 6.2: Iskorišćenost kanala kao funkcija broja mrežnih čvorova - *range-based* BER model.

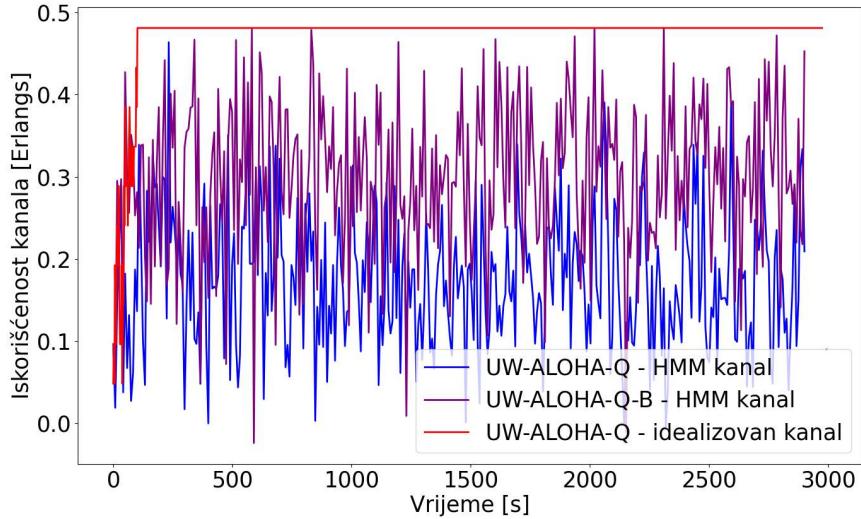
Na slici 6.3 prikazano je isto poređenje ali u slučaju HMM modela kanala. Zaključuje se da performanse svih protokola trpe, a najdrastičniji pad izražen je upravo kod UW-ALOHA-Q koji ne uspijeva da konvergira čak ni u situaciji kada mrežu čini svega 5 elemenata. Razlog ovome je takođe *backoff* mehanizam koji se sada aktivira mnogo češće s obzirom da gubitke paketa (paketa podataka i ACK paketa) uzrokuju i spoljašnji faktori a ne samo interferencija sa ostalim elementima mreže. Sa druge strane, performanse UW-ALOHA-Q-B protokola takođe trpe ali u mnogo manjoj mjeri i relativno su stabilne.



Slika 6.3: Iskorišćenost kanala kao funkcija broja mrežnih čvorova - HMM BER model.

Iz prethodno iznijetih analiza jasno je da *backoff* mehanizam koji pomjera početak frejma nakon svake neuspješne transmisije ometa efikasnost protokola u realnim uslovima. U narednim simulacijama uporediće se dva *backoff* mehanizma: originalni *backoff* mehanizam UW-ALOHA-Q protokola i mehanizam predložen u poglavljju 5.1 (UW-ALOHA-Q-B).

Na slici 6.4 prikazana je iskorišćenost kanala kroz vrijeme za mrežu sa 10 podvodnih čvorova i maksimalnim rastojanjem između podvodnih čvorova i *sink* čvora na površini vode od 500 m. U idealizovanom kanalu, UW-ALOHA-Q brzo konvergira i ostaje u stanju konvergencije do kraja simulacije. S druge strane, kada isti protokol funkcioniše u realnom kanalu, iskorišćenost kanala ne dostiže optimalnu vrijednost (u ovom slučaju oko 0.48). Međutim, primjenom novog predloženog *backoff* mehanizma (UW-ALOHA-Q-B protokol) performanse se značajno poboljšavaju, te u nekoliko navrata iskorišćenost kanala dostiže optimalnu vrijednost. Važno je napomenuti da se u slučaju HMM modela kanala ne može očekivati potpuna konvergencija, jer će se česti gubici paketa dešavati čak i bez interferencije između mrežnih čvorova.



Slika 6.4: Iskorišćenost kanala kroz vrijeme - različiti *backoff* mehanizmi.

6.2.2 Analiza performansi UW-ALOHA-Q-SC i UW-ALOHA-Q-SS protokola

U ovom poglavlju predstavljeni su rezultati analize jednokanalnih sinhronizovanih verzija UW-ALOHA-Q protokola, koje su opisane u prethodnom poglavlju, odnosno UW-ALOHA-Q-SC i UW-ALOHA-Q-SS. Ovi protokoli su razvijeni imajući u vidu ograničenja akustičnih modema, koji imaju veoma uzak frekvencijski opseg. Prethodna analiza UW-ALOHA-Q protokola bila je zasnovana na problematičnoj pretpostavci da se raspoloživi frekvencijski opseg može lako podijeliti na dva podopsega bez gubitka spektralne efikasnosti. Zbog neidealnosti filtara za razdvajanje podkanala, takvo rješenje nije praktično u stvarnim uslovima. Stoga su sinhronizovane verzije, UW-ALOHA-Q-SC i UW-ALOHA-Q-SS, predložene kako bi omogućile efikasno funkcionisanje unutar ograničenog frekvencijskog opsega, koristeći samo jedan kanal za prenos podataka i potvrda. Cilj je bio smanjenje interferencije, minimizacija gubitaka i pojednostavljenje sistema, uz održavanje zadovoljavajućih performansi protokola. U narednim dijelovima ovog poglavlja, rezultati performansi ovih protokola biće prikazani i analizirani kroz različite scenarije, istovremeno upoređujući ih sa standardnim UW-ALOHA-Q protokolom, kao i sa TDMA i ALOHA-CS protokolima.

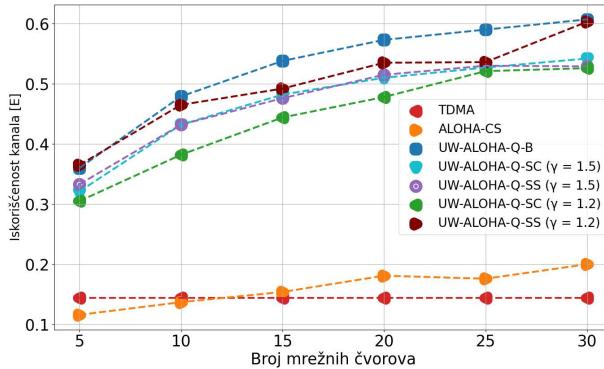
Na slici 6.5 prikazan je uticaj promjene gustine mreže na iskorišćenost kanala kod TDMA, ALOHA-CS, UW-ALOHA-Q-B i dvije varijacije UW-ALOHA-Q-CS i UW-ALOHA-Q-SS protokola, koje se razlikuju po vrijednosti parametra γ .

U slučaju maksimalnog rastojanja od 500 m (slika 6.5a), UW-ALOHA-Q-SC protokol pruža nešto bolje performanse kad γ iznosi 1.5. Ovakvi rezultati su u skladu sa očekivanjima jer za vrijednost γ od 1.2 slotovi su skraćeni i mreža teže konvergira. Sa povećanjem maksimalnog rastojanja na 1000 m (slika 6.5b) i 1500 m (slika 6.5c), razlika između performansi UW-ALOHA-Q-SC protokola za vrijednosti γ od 1.5 i 1.2 postaje zanemarljiva. Posmatrajući sliku 5.1, može se zaključiti da je ovo posledica povećanja propagacionog kašnjenja koje podrazumeva značajno produženje frejma, pa se uticaj trajanja slot-a na trajanje frejma smanjuje. Sa druge strane, UW-ALOHA-Q-SS protokol sa $\gamma = 1.2$ ima veću iskorišćenost kanala nego kada mu je $\gamma = 1.5$. Ovo je posledica implementacije sub-slotova koji unose mogućnost prilagođavanja vremena slanja paketa u slotu, dajući protokolu šansu da bolje iskoristi dostupne resurse.

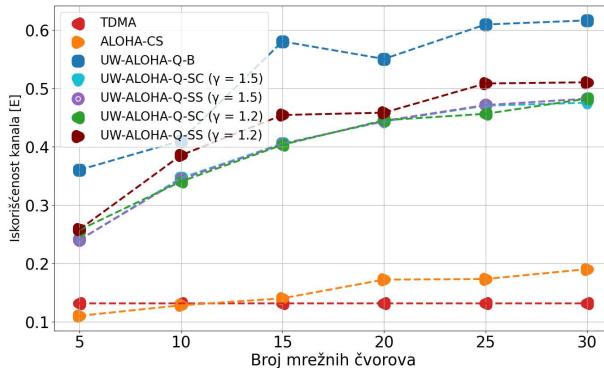
Sa slike 6.5 se jasno uočava da je za sve vrijednosti γ parametra i maksimalnog rastojanja u mreži UW-ALOHA-Q-SS superiorniji u odnosu na UW-ALOHA-Q-SC. Za maksimalnu distancu od 500m, UW-ALOHA-Q-SS sa $\gamma = 1.5$ nadmašuje UW-ALOHA-Q-SC sa $\gamma = 1.2$. Za istu vrijednost maksimalne distance, performanse UW-ALOHA-Q-SS protokola se približavaju performansama UW-ALOHA-Q-B protokola, koji koristi odvojene kanale za slanje paketa podata i ACK poruka ali ima manje efikasnu organizaciju frejma.

Na slikama 6.5b i 6.5c primjećuje se da sa povećanjem maksimalne distance iskorišćenost kanala kod UW-ALOHA-Q-B protokola počinje da naizmjenično mijenja monotnost u susjednim intervalima (raste pa opada). Ovaj fenomen se može objasniti posmatrajući tabelu 6.3 iz koje se vidi da se za različit broj mrežnih elemenata frejm dijeli na isti broj slotova. Za očekivati je da u tom slučaju mreža sa više elemenata ostvari bolje performanse. Kada bi se korak povećanja broja mrežnih čvorova smanjio, dobila bi se funkcija koja liči na testerastu, pri čemu bi se nagli skokovi dešavali za vrijednost broja čvorova kada se, prema jednačini 4.3, i broj slotova povećava.

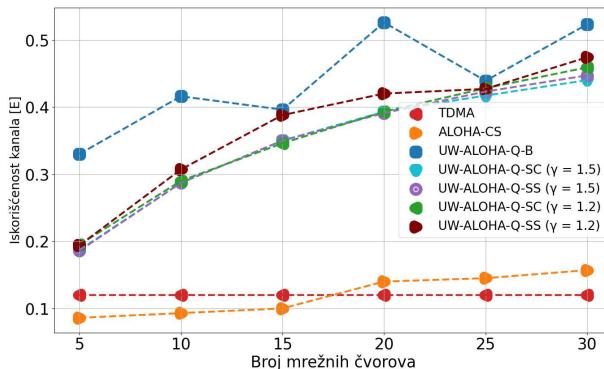
Na slici 6.6 prikazani su rezultati u pogledu iskorišćenosti kanala za mreže sa različitim brojem čvorova pri HMM modelu kanala. Ponovo, prilikom analize sinhronizovanih jednokanalnih verzija UW-ALOHA-Q protokola razmatrane su dvije



(a) 500m



(b) 1000m

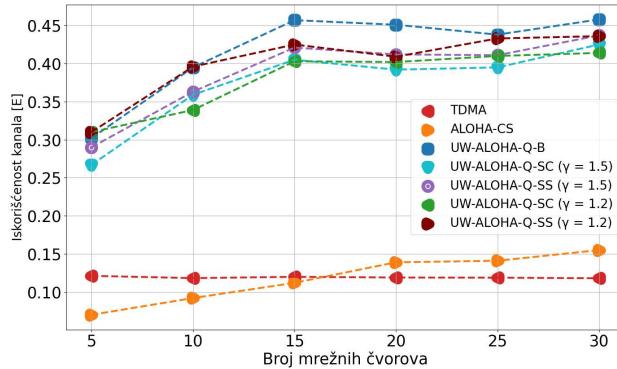


(c) 1500m

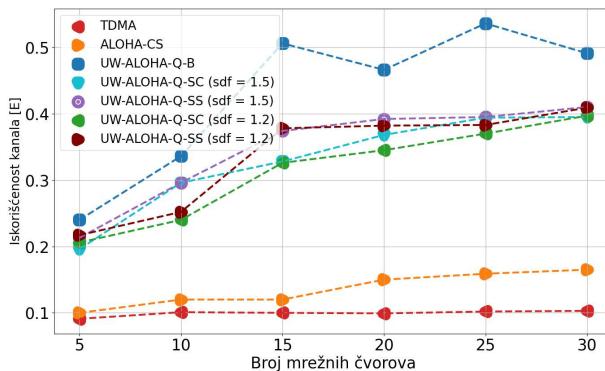
Slika 6.5: Iskorišćenost kanala u funkciji broja čvorova mreže pri *range-based* modelu kanala, za različita maksimalna rastojanja od sink čvora: a) 500m, b) 1000m, c) 1500m.

različite vrijednosti parametra γ : 1.2 i 1.5. Sa slike se vidi da u svakom scenariju UW-ALOHA-Q-SS ostvaruje bolje performanse nego UW-ALOHA-Q-SC. Takođe, razlika u stepenu iskorišćenosti kanala između UW-ALOHA-Q-SS i UW-ALOHA-Q-SC za $\gamma = 1.5$ i maksimalne distance 1000m i 1500m postaje uočljiva, jer pogoršanjem stanja na kanalu značaj implementacije sub-slotova raste. Razlog ovome je povećan broj neuspješnih transmisija uslovljen HMM modelom kanala, pa u ovom slučaju širina slot-a pri $\gamma = 1.2$ nije dovoljna da bi se održala konzistentnost performansi. Takođe, treba uzeti u obzir da rezultati ovih simulacija imaju značajnu varijansu uslijed HMM modela kanala.

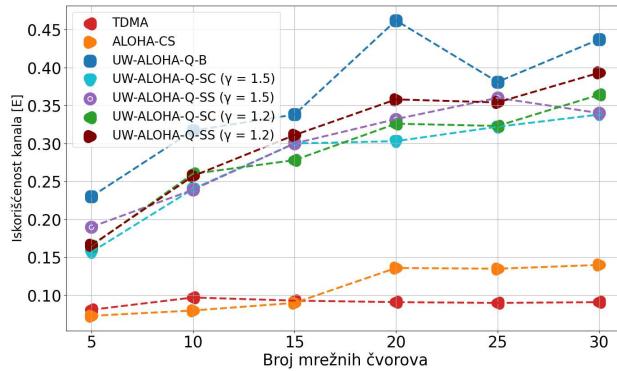
Na slici 6.7 prikazan je uticaj promjene parametra γ na iskorišćenost kanala za mrežu od 10, 15 i 20 elemenata u slučaju range-based i HMM BER modela. Na slici 6.7a se vide rezultati za pojednostavljeni model kanala koji uzima u obzir samo uticaj udaljenosti između čvorova na slabljenje signala, dok se uticaj realistično modelovanog kanala ogleda u razlici između slika 6.7a i 6.7b. Može se zaključiti da protokol, nezavisno od topologije mreže, najbolje performanse ostvaruje kada je $1.2 < \gamma < 1.6$. Za vrijednosti manje od 1.2, frejm je prekratak da bi se ostvarila konvergencija, pa česte retransmisije nepovoljno utiču na iskorišćenost kanala. Sa druge strane, kada je γ veći od 1.6, mreža gotovo uvijek konvergira, ali produženo trajanje frejma obara performanse protokola.



(a) 500m

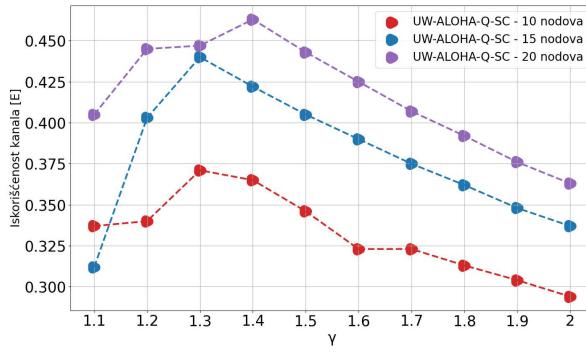


(b) 1000m

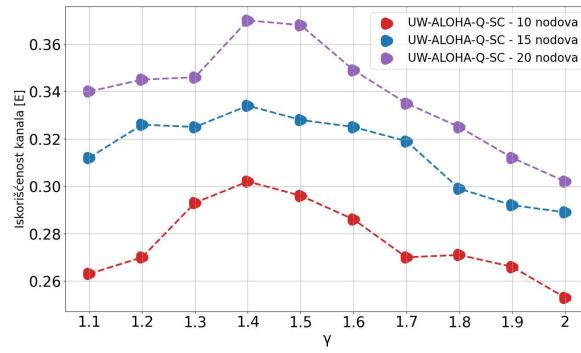


(c) 1500m

Slika 6.6: Iskorišćenost kanala u funkciji broja čvorova mreže pri HMM modelu kanala, za različita maksimalna rastojanja od *sink* čvora: a) 500m, b) 1000m, c) 1500m.



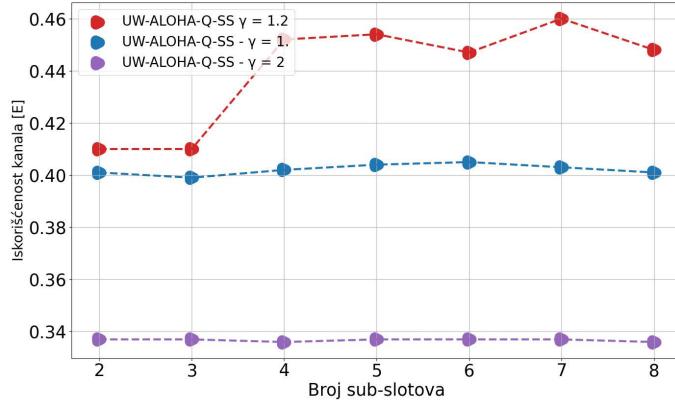
(a) Range-based BER



(b) HMM BER

 Slika 6.7: Uticaj parametra γ na iskorišćenost kanala za mrežu sa 10, 15, 20 podvodnih čvorova.

Na slici 6.8 prikazan je uticaj broja sub-slotova na performanse UW-ALOHA-Q-SS protokola za različite vrijednosti parametra γ . Može se zaključiti da broj sub-slotova nema uticaja na iskorišćenost kanala za veće vrijednosti parametra γ . Ovo se objašnjava činjenicom da mreža sa dovoljno proširenim slotovima konvergira i bez prilagođavanja vremena u slotu kada će agenti poslati paket. Ako se broj sub-slotova postavi na 1, radi se zapravo o UW-ALOHA-Q-SC protokolu, pa se očekuje da će pri malom broju sub-slotova ova dva protokola imati slične performanse. Sa druge strane, kada je $\gamma = 1.2$, povećanje broja sub-slotova pozitivno utiče na stepen iskorišćenosti kanala. Pri tome, može se uočiti da korišćenje 4-5 sub-slotova u razmatranom scenariju predstavlja najefikasnije rešenje, jer dalje povećanje ne doprinosi značajnom poboljšanju iskorišćenosti kanala, a povećava računsku kompleksnost.

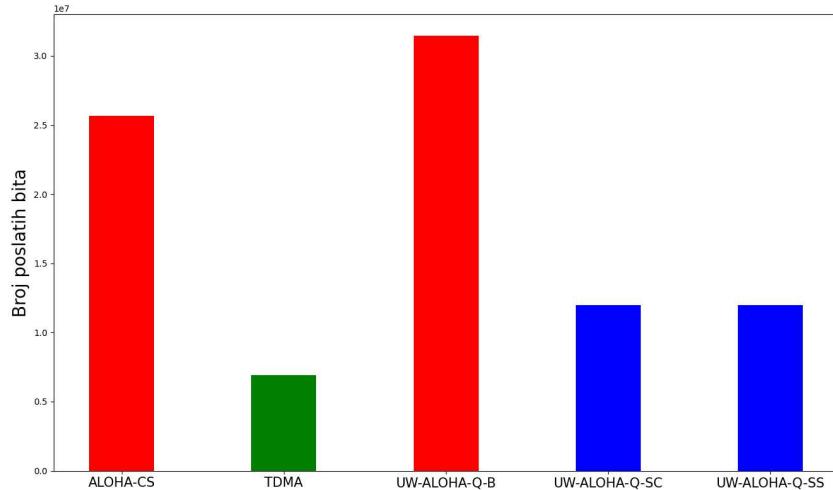


Slika 6.8: Uticaj broja sub-slotova na performanse UW-ALOHA-Q-SS protokola pri razlicitim vrijednostima parametra γ .

6.2.3 Energetska efikasnost

Na slici 6.9 prikazana je potrošnja energije kod svih prethodno analiziranih protokola. Pod pretpostavkom fiksne transmisione snage i odsustva *wake-up* mehanizma, kao mjerena jedinica uzet je prenos jednog bita. Rezultati su prikupljeni iz simulacija u trajanju od 3000 sekundi, za mrežu koja se sastoji od 15 elemenata. Za UW-ALOHA-Q-SC i UW-ALOHA-SS, γ parametar je postavljen na 1.5, dok je kod UW-ALOHA-Q-SS broj sub-slotova podešen na 5. Prilikom mjerjenja potrošnje energije nije mjerena potrošnja prilikom postupka sinhronizacije, koja bi dodatno povećala potrošnju UW-ALOHA-Q-CS i UW-ALOHA-Q-SS protokola uslijed značajnog povećanja zaglavljivača kao i česte potrebe za pokretanjem postupka uslijed *clock drift-a*.

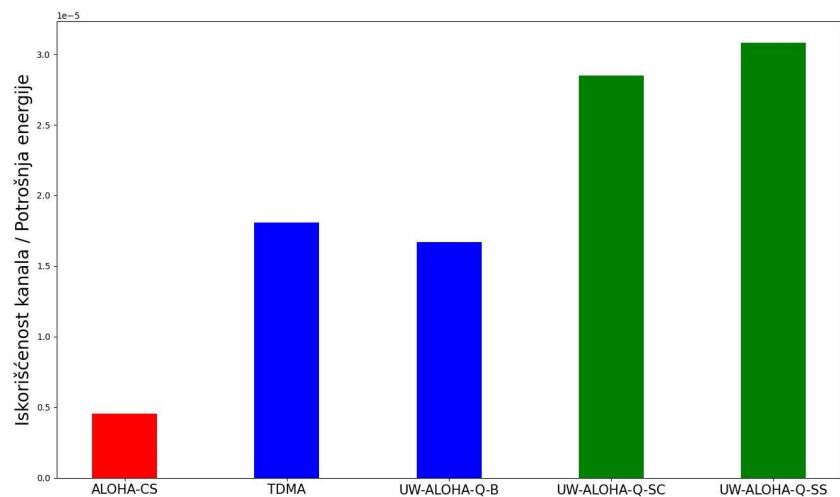
Sa slike 6.9 jasno se vidi da ALOHA-CS i UW-ALOHA-Q imaju najveću potrošnju energije, što je rezultat neefikasnog rasporeda prenosa i većeg broja kolizija prilikom pokušaja slanja podataka. S druge strane, UW-ALOHA-Q-SC i UW-ALOHA-Q-SS su znatno energetski efikasniji zahvaljujući sinhronizaciji koja smanjuje broj nepotrebnih prenosa i kolizija. Očekivano, TDMA ima najmanju potrošnju energije zbog unaprijed definisanog rasporeda prenosa, gdje svaki čvor dobija svoj *slot*, čime se izbjegava konkurenca prilikom pristupa kanalu.



Slika 6.9: Potrošnja energije analiziranih protokola.

Kako bi se dobio detaljniji uvid u sveukupne performanse protokola, na slici 6.10 prikazan je odnos između iskorišćenosti kanala i potrošnje energije za protokole sa istim parametrima simulacija. Ovaj pokazatelj kombinuje efikasnost u iskorišćenju kanala i energetsku efikasnost, dajući jasniji prikaz ukupnih performansi svakog od protokola. Rezultati pokazuju da, po ovom kriterijumu, UW-ALOHA-SC i UW-ALOHA-Q-SS značajno nadmašuju ostale protokole, postižući bolji balans između potrošnje energije i iskorišćenosti kanala.

UW-ALOHA-Q, iako energetski manje efikasan od sinhronizovanih verzija, pruža performanse slične TDMA protokolu. Međutim, s obzirom na fleksibilnost podešavanja parametara kod UW-ALOHA-Q, očekuje se da ovaj odnos može varirati u zavisnosti od specifičnih postavki simulacija. Nasuprot tome, kod TDMA protokola, rezultati su relativno stabilni i očekivano je da ostanu približno isti bez obzira na scenario, zbog statične prirode raspodjele prenosa.



Slika 6.10: Poređenje iskorišćenosti kanala i energetske potrošnje za analizirane protokole.

Zaključak

Cilj ovog istraživanja bio je pokazati da implementacija mašinskog učenja u razvoju MAC protokola za podvodne akustične senzorske mreže može značajno unaprijediti komunikaciju u složenim i izazovnim uslovima podvodnog okruženja. Specifične karakteristike podvodnog akustičnog kanala, kao što su veliko propagaciono kašnjenje, ograničeni propusni opseg i značajna potrošnja energije, predstavljaju ozbiljne izazove za tradicionalne MAC protokole, koji su prvobitno razvijeni za nadzemne mreže. Iako su mnogi koncepti u dizajnu MAC protokola zasnovanih na mašinskom učenju preuzeti iz nadzemnih mreža, uz adekvatne adaptacije, ovi protokoli su pokazali značajan potencijal u podvodnim akustičnim mrežama. Adaptivni mehanizmi koje pružaju omogućavaju efikasniju raspodjelu resursa, smanjenje broja kolizija i poboljšanje energetske efikasnosti, što ih čini pogodnim za primjenu u izazovnim uslovima podvodnih komunikacija.

U razmatranom scenariju – zvijezda topologiji sa centralnim prijemnikom na površini vode, rezultati simulacija pokazuju da MAC protokoli bazirani na najjednostavnijim oblicima pojačanog učenja značajno nadmašuju tradicionalna rješenja, poput TDMA ili ALOHA, za sve analizirane vrijednosti gustine i veličine mreže. Ovi protokoli su se pokazali vrlo prilagodljivim, čak i uz minimalne korekcije, te su uspjeli da se efikasno prilagode realnim uslovima kanala, zadržavajući superiornost u odnosu na tradicionalna rješenja. Kroz rezultate su prikazani ključni parametri koji karakterišu svaki od protokola, kao i njihov uticaj na performanse. Iako nije moguće precizno odrediti univerzalno najbolje vrijednosti parametara, pružena je osnova za njihovu selekciju u zavisnosti od konkretnih uslova, kao što su gustina i veličina mreže.

Takođe je pokazano da MAC protokoli bazirani na mašinskom učenju imaju variabilnu potrošnju energije, uglavnom zbog adaptacija povezanih sa sinhronizacijom, pri čemu sinhronizovani prijemnici šalju značajno manji broj paketa. Kada se protokoli uporede uzimajući u obzir energetsku efikasnost i iskorišćenost kanala, sinhro-

ZAKLJUČAK

nizovani protokoli bazirani na mašinskom učenju postižu najbolji balans, pri čemu redoslijed unapređenja direktno doprinosi poboljšanju ukupnih performansi.

U ovom radu je pokazano da se primjenom najjednostavnijih tehnika mašinskog učenja mogu ostvariti značajna poboljšanja u performansama podvodnih senzorskih mreža, što je od velike važnosti za primjene poput dugoročnog nadzora podvodnih ekosistema, monitoringa kvaliteta vode i drugih sličnih aplikacija. Buduća istraživanja mogla bi se fokusirati na razvoj složenijih algoritama mašinskog učenja koji bi dodatno unaprijedili MAC protokole, uzimajući u obzir ograničene procesorske mogućnosti podvodnih uređaja. Takođe, potrebno je detaljnije ispitati otpornost ovih protokola na specifične smetnje i promjene u mreži, kao što su povećana mobilnost agenata i viši nivoi interferencije, koji su u ovom radu kumulativno obrađeni kroz HMM model. Nadalje, bilo bi korisno testirati ove protokole na realnim uređajima u stvarnim morskim uslovima, kako bi se dobila potpuna slika o vjerodostojnosti simulacija i modeliranju fizičkog kanala.

Bibliografija

- [1] F. Campagnaro, A. Signori, and M. Zorzi, “Wireless remote control for underwater vehicles,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, p. 736, 09 2020.
- [2] M. Stojanovic, “On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel,” in *Proceedings of the 1st International Workshop on Underwater Networks*, WUWNet ’06, (New York, NY, USA), p. 41–47, Association for Computing Machinery, 2006.
- [3] C. Wang *et al.*, “Wireless mac protocol synthesis and optimization with multi-agent distributed reinforcement learning,” *arXiv preprint arXiv:2408.05884*, 2024.
- [4] R. Masiero, S. Azad, F. Favaro, M. Petrani, G. Toso, F. Guerra, P. Casari, and M. Zorzi, “Desert underwater: An ns-miracle-based framework to design, simulate, emulate and realize test-beds for underwater network protocols,” in *2012 Oceans - Yeosu*, pp. 1–10, 2012.
- [5] S. H. Park, P. D. Mitchell, and D. Grace, “Reinforcement learning based mac protocol (uw-aloha-q) for underwater acoustic sensor networks,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 165531–165542, 2019.
- [6] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, “Underwater acoustic sensor networks: research challenges,” *Ad Hoc Networks*, vol. 3, no. 3, pp. 257–279, 2005.
- [7] B. Ferreira, A. Matos, and N. Cruz, “Single beacon navigation: Localization and control of the mares auv,” in *OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE*, pp. 1–9, 2010.
- [8] C. Lodovisi, P. Loreti, L. Bracciale, and S. Betti, “Performance analysis of hybrid optical-acoustic auv swarms for marine monitoring,” *Future Internet*, vol. 10, no. 7, 2018.

- [9] S. Climent, A. Sanchez, J. V. Capella, N. Meratnia, and J. J. Serrano, “Underwater acoustic wireless sensor networks: Advances and future trends in physical, mac and routing layers,” *Sensors*, vol. 14, no. 1, pp. 795–833, 2014.
- [10] K. G. Omeke, A. Abohmra, M. A. Imran, Q. H. Abbasi, and L. Zhang, “Characterization of rf signals in different types of water,” in *Antennas and Propagation Conference 2019 (APC-2019)*, pp. 1–6, 2019.
- [11] J. Heidemann, M. Stojanovic, and M. Zorzi, “Underwater sensor networks: Applications, advances and challenges,” *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, vol. 370, pp. 158–75, 01 2012.
- [12] D. Makhija, P. Kumaraswamy, and R. Roy, “Challenges and design of mac protocol for underwater acoustic sensor networks,” in *2006 4th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks*, pp. 1–6, 2006.
- [13] E. Khater, N. El-Fishawy, M. Tolba, D. Ibrahim, and M. Badawy, “Review of aloha-based mac protocols for underwater wireless sensor networks. (dept.e. computer),” *MEJ. Mansoura Engineering Journal*, vol. 47, pp. 12–25, 03 2022.
- [14] N. Chirdchoo, W.-S. Soh, and K. C. Chua, “Aloha-based mac protocols with collision avoidance for underwater acoustic networks,” in *IEEE INFOCOM 2007 - 26th IEEE International Conference on Computer Communications*, pp. 2271–2275, 2007.
- [15] J. Ahn, A. Syed, B. Krishnamachari, and J. Heidemann, “Design and analysis of a propagation delay tolerant aloha protocol for underwater networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 9, no. 5, pp. 752–766, 2011.
- [16] A. A. Syed, W. Ye, J. Heidemann, and B. Krishnamachari, “Understanding spatio-temporal uncertainty in medium access with aloha protocols,” in *Proceedings of the 2nd Workshop on Underwater Networks, WUWNet '07*, (New York, NY, USA), p. 41–48, Association for Computing Machinery, 2007.
- [17] C. li, Y.-J. Xu, C. Xu, Z. An, B. Diao, and X.-W. Li, “Dtmac: A delay tolerant mac protocol for underwater wireless sensor networks,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, pp. 1–1, 01 2015.
- [18] D. Fang, Y. Li, H. Huang, and L. Yin, “A csma/ca-based mac protocol for underwater acoustic networks,” in *2010 6th International Conference on Wireless*

- Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, pp. 1–4, 2010.
- [19] B. Peleato and M. Stojanovic, “Distance aware collision avoidance protocol for ad-hoc underwater acoustic sensor networks,” *IEEE Communications Letters*, vol. 11, no. 12, pp. 1025–1027, 2007.
 - [20] A. A. Syed, W. Ye, and J. Heidemann, “T-lohi: A new class of mac protocols for underwater acoustic sensor networks,” in *IEEE INFOCOM 2008 - The 27th Conference on Computer Communications*, pp. 231–235, 2008.
 - [21] Y. Han and Y. Fei, “Dap-mac: A delay-aware probability-based mac protocol for underwater acoustic sensor networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 48, pp. 80–92, 2016.
 - [22] M. Molins and M. Stojanovic, “Slotted fama: a mac protocol for underwater acoustic networks,” *OCEANS 2006 - Asia Pacific*, pp. 1–7, 2006.
 - [23] X. Guo, M. R. Frater, and M. J. Ryan, “A propagation-delay-tolerant collision avoidance protocol for underwater acoustic sensor networks,” in *OCEANS 2006 - Asia Pacific*, pp. 1–6, 2006.
 - [24] Y. Noh, U. Lee, S. Han, P. Wang, D. Torres, J. Kim, and M. Gerla, “Dots: A propagation delay-aware opportunistic mac protocol for mobile underwater networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 13, no. 4, pp. 766–782, 2014.
 - [25] L. Bommisetty, S. Gaddam, N. Reddy, S. Basharath, and B. Are, “Cdma for underwater acoustic communication,” 11 2021.
 - [26] L. Hong, F. Hong, Z.-W. Guo, and X. Yang, “A tdma-based mac protocol in underwater sensor networks,” in *2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, pp. 1–4, 2008.
 - [27] Y. Zhong, J. Huang, and J. Han, “A tdma mac protocol for underwater acoustic sensor networks,” in *2009 IEEE Youth Conference on Information, Computing and Telecommunication*, pp. 534–537, 2009.
 - [28] N. Morozs, P. Mitchell, and Y. V. Zakharov, “Tda-mac: Tdma without clock synchronization in underwater acoustic networks,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1091–1108, 2018.

- [29] K. Tu, T. M. Duman, M. Stojanovic, and J. G. Proakis, “Ofdma for underwater acoustic communications,” in *2011 49th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)*, pp. 633–638, 2011.
- [30] S. Jiang, “State-of-the-art medium access control (mac) protocols for underwater acoustic networks: A survey based on a mac reference model,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. PP, pp. 1–1, 11 2017.
- [31] M. Zhu, W. Zhang, N. Jin, Z. Qin, J. Xin, and L. Wang, “Upmac: A localized load-adaptive mac protocol for underwater acoustic networks,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 11, pp. 4110–4118, 2016.
- [32] D. Pompili, T. Melodia, and I. F. Akyildiz, “A cdma-based medium access control for underwater acoustic sensor networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 4, pp. 1899–1909, 2009.
- [33] K. B. Kredo and P. Mohapatra, “A hybrid medium access control protocol for underwater wireless networks,” in *Proceedings of the 2nd Workshop on Underwater Networks*, WUWNet ’07, (New York, NY, USA), p. 33–40, Association for Computing Machinery, 2007.
- [34] Z. Zheng, S. Jiang, R. Feng, L. Ge, and C. Gu, “Survey of reinforcement-learning-based mac protocols for wireless ad hoc networks with a mac reference model,” *Entropy*, vol. 25, no. 1, 2023.
- [35] L. Wang, C. Lin, K. Chen, and Y. Zhang, “A learning-based aloha protocol for underwater acoustic sensor networks,” in *Proceedings of the 13th International Conference on Underwater Networks & Systems*, WUWNet ’18, (New York, NY, USA), Association for Computing Machinery, 2018.
- [36] Y. Chu, P. D. Mitchell, and D. Grace, “Aloha and q-learning based medium access control for wireless sensor networks,” in *2012 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, pp. 511–515, 2012.
- [37] S. Park, P. Mitchell, and D. Grace, “Performance of the aloha-q mac protocol for underwater acoustic networks,” 08 2018.
- [38] B. Jang, M. Kim, G. Harerimana, and J. W. Kim, “Q-learning algorithms: A comprehensive classification and applications,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 133653–133667, 2019.

- [39] S. H. Park, P. D. Mitchell, and D. Grace, “Reinforcement learning based mac protocol (uw-aloha-qm) for mobile underwater acoustic sensor networks,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 5906–5919, 2021.
- [40] X. Geng and Y. R. Zheng, “Mac protocol for underwater acoustic networks based on deep reinforcement learning,” in *Proceedings of the 14th International Conference on Underwater Networks & Systems*, WUWNet ’19, (New York, NY, USA), Association for Computing Machinery, 2020.
- [41] X. Ye, Y. Yu, and L. Fu, “Deep reinforcement learning based mac protocol for underwater acoustic networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 21, no. 5, pp. 1625–1638, 2022.
- [42] K. Ovaliadis, S. N, and V. Kanakaris, “Energy efficiency in underwater sensor networks: A research review,” *Journal of Engineering Science and Technology Review*, vol. 3, 06 2010.
- [43] N. Morozs, W. Gorma, B. T. Henson, L. Shen, P. D. Mitchell, and Y. V. Zakharov, “Channel modeling for underwater acoustic network simulation,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 136151–136175, 2020.
- [44] P. Xie, Z. Zhou, Z. Peng, H. Yan, T. Hu, J.-H. Cui, Z. Shi, Y. Fei, and S. Zhou, “Aqua-sim: An ns-2 based simulator for underwater sensor networks,” in *OCE-ANS 2009*, pp. 1–7, 2009.
- [45] S. Shahabudeen and M. Chitre, “Design of networking protocols for shallow water peer-to-peer acoustic networks,” in *Europe Oceans 2005*, vol. 1, pp. 628–633 Vol. 1, 2005.
- [46] E. F. Morales and H. J. Escalante, “Chapter 6 - a brief introduction to supervised, unsupervised, and reinforcement learning,” in *Biosignal Processing and Classification Using Computational Learning and Intelligence* (A. A. Torres-García, C. A. Reyes-García, L. Villaseñor-Pineda, and O. Mendoza-Montoya, eds.), pp. 111–129, Academic Press, 2022.
- [47] M. Otterlo and M. Wiering, “Reinforcement learning and markov decision processes,” *Reinforcement Learning: State of the Art*, pp. 3–42, 01 2012.
- [48] R. S. Sutton and A. G. Barto, *Reinforcement learning: An introduction*. MIT press, 2018.
- [49] A. Slivkins, “Introduction to multi-armed bandits,” 2024.

- [50] R. W. Turner, “Submarine communication antenna systems,” *Proceedings of the IRE*, vol. 47, no. 5, pp. 735–739, 1959.
- [51] W. Chen, Q. Guan, H. Yu, F. Ji, and F. Chen, “Medium access control under space-time coupling in underwater acoustic networks,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 15, pp. 12398–12409, 2021.
- [52] J. Hovem, “Underwater acoustics: Propagation, devices and systems,” *Journal of Electroceramics*, vol. 19, pp. 339–347, 12 2007.
- [53] T. Santoso, E. Widjiati, I. Wirawan, and G. Hendrantoro, “Underwater acoustic channel characterization of shallow water environment,” *EMITTER International Journal of Engineering Technology*, vol. 6, 07 2018.
- [54] M. Stojanovic and J. Preisig, “Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 1, pp. 84–89, 2009.
- [55] F. Campagnaro, R. Francescon, F. Guerra, F. Favaro, P. Casari, R. Diamant, and M. Zorzi, “The desert underwater framework v2: Improved capabilities and extension tools,” in *2016 IEEE Third Underwater Communications and Networking Conference (UComms)*, pp. 1–5, 2016.
- [56] N. Toffolo, A. Montanari, F. Campagnaro, and M. Zorzi, “Modeling acoustic channel variability in underwater network simulators from real field experimental data,” in *OCEANS 2022, Hampton Roads*, pp. 1–7, 2022.