

UNIVERZITET SINGIDUNUM
Departman za poslediplomske studije
Danijelova 32, Beograd

4-157/124
25.12.2024.

VEĆU DEPARTMANA ZA POSLEDIPLOMSKE STUDIJE

Odlukom Veća Departmana za poslediplomske studije broj 4-65/2024 od 18.04.2024. godine, određeni smo za članove Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata Dejana Dašića pod nazivom "*Distributed Reinforcement and Deep Learning for Spectrum Management in Cognitive Radio Networks*" o čemu podnosimo sledeći

IZVEŠTAJ

1. Osnovni podaci o kandidatu i doktorskoj disertaciji

Kandidat Dejan Dašić je rođen 30.11.1978. god. u Beogradu. U Beogradu je završio osnovnu školu (OŠ Ćirilo i Metodije), a nakon nje i VI beogradsku gimnaziju prirodno matematičkog smera, kao učenik generacije. Nakon završetka gimnazije upisao je Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu 1997. god. Diplomirao je na katedri za radio sisteme 2002. god. sa prosečnom ocenom 8.74. Diplomski rad "Programski paket za proračun digitalnih radio-relejnih veza" uspešno je odbranio sa ocenom 10.

Od 2004. godine neprekidno radi u Vlatacom institutu visokih tehnologija iz Beograda. Učesnik je i rukovodilac većeg broja projekata u oblasti sistem integracije. Trenutno je angažovan kao sistem arhitekta značajnog strateškog projekta za stranog korisnika.

Kandidat ima sledeći objavljeni rad kategorije M21 čime je ispunjen preduslov za odbranu doktorske disertacije: Dašić, Dejan; Ilić, Nemanja; Vučetić, Miljan; Perić, Miroslav; Beko, Marko; Stanković, Miloš S. 2021. "Distributed Spectrum Management in Cognitive Radio Networks by Consensus-Based Reinforcement Learning" *Sensors*, 21, no. 9: 2970.

<https://doi.org/10.3390/s21092970>

Preostali objavljeni radovi:

Spisak rezultata M21a

1. Ilić, Nemanja; Dašić, Dejan; Vučetić, Miljan; Makarov, Aleksej; Petrović, Ranko, 2024. "Distributed web hacking by adaptive consensus-based reinforcement learning", *Artificial Intelligence*, 326, 104032, <https://doi.org/10.1016/j.artint.2023.104032>

Spisak rezultata M51

2. Dašić D, Vučetić M, Ilić N, Stanković MS, Beko M (2021) "Application of Deep Learning Algorithms and Architectures in the New Generation of Mobile Networks", *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 18, No. 3, October 2021, p.397-426, DOI: <https://doi.org/10.2298/SJEE2103397DP>

Spisak rezultata M33

3. Radica Todorović, Dejan Dašić, Mirko Obradović "Hybrid Power Supply System for Telecommunication Sites", *3rd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering IcETRAN 2016*, Zlatibor, Serbia, 2016.
4. Dejan Dašić, Miljan Vučetić, Gardelito Hew A Kee, Miloš Stanković: "Deep learning applications in mobile networks, *International Scientific Conference on Information Technology and Data Related Research SINTEZA 2019*, Novi Sad, Serbia, 2019, pp. 553-560, DOI: 10.15308/Sinteza-2019-553-560
5. Dejan Dašić, Miljan Vučetić, Miroslav Perić, Marko Beko, and Miloš Stanković. 2020. Cooperative Multi-Agent Reinforcement Learning for Spectrum Management in IoT Cognitive Networks. In *Proceedings of the 10th International Conference on Web Intelligence, Mining and Semantics (WIMS 2020)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 238–247. DOI: <https://doi.org/10.1145/3405962.3405996>

Spisak rezultata M63

6. Dejan Dašić „Software package for calculation of digital radio-relay lines“, *11th Telecommunications Forum TELFOR 2003*, Belgrade, Serbia, 2003.

Doktorska disertacija kandidata *Distributed Reinforcement and Deep Learning for Spectrum Management in Cognitive Radio Networks* je urađena na ukupno 103 strane, od čega 12 strana čini spisak literature. Spisak literature obuhvata 163 referenci koje čine naučni radovi, knjige, zbornici radova, zakonski propisi kao i elektronski izvori. Uz osnovni tekst disertacija sadrži i 15 slika i 5 tabela.

Doktorska disertacija kandidata Dejana Dašića je bila podvrgnuta proverbi softverom za ustanovljavanje preklapanja/plagijarizma (*iThenticate Plagiarism Detection Software*). Ukupan

procentualni iznos zapaženih preklapanja iznosi 37% disertacije. Ovaj procenat preklapanja je prihvatljiv s obzirom na to da pri proveru nisu bila isključena preklapanja u poglavlju gde je spisak literature (što čini oko 12%), kao i zbog toga što je većina ostalog preklapanja sa striktnim matematičkim formulacijama iz objavljenih radova kandidata. Ostala preklapanja su manja od 1% po pojedinim radovima i odnose se na pojmove i definicije. Ne postoji ni jedan pasus koji se poklapa sa nekim iz literature.

2. Predmet i cilj istraživanja

Istraživanje u okviru ove doktorske disertacije rezultiralo je razvojem novog algoritma za distribuirano upravljanje spektrom i odabir komunikacionog kanala zasnovanog na distribuiranom konsenzusu u kognitivnim radio mrežama. Algoritam se primenjuje u okviru multi-agentne šeme učenja potkrepljenjem (engl. *Reinforcement Learning* - *RL*). Predložena strategija konsenzusa, primenjena putem usmerene, vremenski promenljive komunikacione mreže niskog propusnog opsega, omogućava saradnju između agenata na decentralizovan i distribuiran način. Motivacija za predloženi pristup dolazi iz uobičajenih scenarija upotrebe kognitivnih radio mreža, u kojima su takva decentralizovana postavka i distribuirani rad od velikog značaja. Predložena postavka omogućava svim agentima upotrebljive informacije o stanju mreže, u inače nepoznatom i neizvesnom okruženju i uslovima primene. Stoga, skup agenata koji učestvuju u mreži postaje sposoban za uspešan proračun optimalne združene strategije (polise) utvrđivanja zauzetosti spektra i odabira komunikacionih kanala, iako pojedinačni agenti to nisu u stanju. Predloženi algoritam je skalabilan i robustan u odnosu na otkaze agenata ili linkova između agenata.

Karakteristika algoritma, kao što su efekat uklanjanja šuma, mogućnost organizacije koordinisanih akcija i poboljšanje brzine konvergencije do kojeg dolazi usled konsenzusa pokazuju njegovu korisnost. Takođe, u disertaciji se razmatra primena tehnika dubokog učenja kako bi se rešavali izazovi povezani sa efikasnim upravljanjem spektrom u radio mrežama nove generacija, radi obezbeđivanja traženog nivoa servisa.

Dakle, glavni ciljevi istraživanja bili su sledeći:

- Formulacija problema upravljanja spektrom u kontekstu multi-agentne postavke učenja potkrepljenjem,
- Razvoj tehnika dubokog učenja koje treba primeniti za identifikaciju radio spektra,
- Modifikacija i proširenje postojeće opšte distribuirane metode učenja potkrepljenjem sa više agenata na takav način da se mogu primeniti na problem upravljanja spektrom,
- Primena algoritama na problem upravljanja spektrom u kognitivnim radio mrežama,
- Simulaciona verifikacija primena tehnika dubokog učenja za evaluaciju aktivnosti primarnih korisnika,
- Simulacioni verifikacija nove šeme upravljanja spektrom.

3. Hipotetički okvir istraživanja

Opšta hipoteza koja je započela istraživanje u disertaciji je:

1. Korišćenje spektra za prenos informacija u kognitivnim mrežama može se poboljšati u distribuiranim sistemima sa više agenata.

Specifične hipoteze koje proizilaze iz opšte su:

1. Ako se ima dovoljno informacija o primarnim korisnicima spektra, duboko učenje se može koristiti za identifikaciju spektra,
2. Korišćenje spektra za prenos informacija u kognitivnim mrežama može se poboljšati uvođenjem konsenzusa u okviru učenja potkrepljenjem u distribuiranim sistemima sa više agenata.

Pojedinačne hipoteze korišćene u disertaciji su:

1. Ako je poznat način rada (modulacija) primarnog korisnika radio spektra, duboko učenje se može koristiti za preciznu identifikaciju aktivnosti primarnih korisnika u kognitivnim radio mrežama,
2. Uvođenje konsenzusa u postavku distribuiranog multiagentskog učenja potkrepljenjem kod upravljanja spektrom u slučaju kognitivnih radio mreža donosi poboljšanje brzine protoka informacija o dostupnim kanalima, odnosno povoljno utiče na postignuto protok informacija sekundarnih korisnika sistema.
3. Sistemi sa više agenata u kognitivnim mrežama mogu postići performanse bliske centralizovanim sistemima i u distribuiranim i u decentralizovanim okruženjima.

4. Metodologija istraživanja

Kandidat je u toku naučnog i istraživačkog rada upotrebio različite metode kako bi bili zadovoljeni osnovni metodološki zahtevi – objektivnost, pouzdanost, opštost i sistematičnost.

U skladu sa izabranom problematikom, definisanim ciljevima istraživanja i postavljenim naučnim hipotezama radi definisanja naučnih i stručnih zaključaka i iznalaženja mogućih rešenja upotrebljena je teorijska analiza uz korišćenje rezultata istraživanja iz međunarodne naučne literature, odnosno saznanja naučnika i drugih autora koji su istraživali problematiku kojom se bavi i ovaj rad. U disertaciji se predstavljaju naučno-teorijska saznanja, relevantna literatura i originalni predlozi korišćenjem većeg broja metoda, i to: istorijske metode, metode kompleksnog posmatranja i analize sadržaja, metode analize i sinteze, metode dokazivanja, kao i eksperimentalne metode.

Primenom istorijskog metoda pribavljeni su rezultati istraživanja drugih autora koji su se bavili problematikom vezanom za tematiku od interesa. Pribavljeni podaci potiču uglavnom iz eminentnih naučnih radova i istraživanja u ovoj oblasti.

Metoda kompleksnog posmatranja i analiza sadržaja primenjena je prilikom obrade rezultata preuzetih iz istraživanja drugih istraživača. Rezultati su upotrebljeni u cilju definisanja nedostataka postojećih algoritama za efikanso upravljanje spektrom u kognitivnim radio mrežama i utvrđivanja pravca za potencijalna unapređenja.

Osnovni izazov koji je ovom doktorskom disertacijom rešen dobijen je kroz razvoj novih algoritama, unapređenje softvera u različitim primenama čime su dobijene bolje performanse uključujući funkcionalnost, robusnost, osetljivost i stepen konvergencije.

U cilju provere efektivnosti i efikasnosti predloženih rešenja, izvršene su simulacije koje su potvrdile inicijalne hipoteze disertacije.

5. Kratak prikaz sadržaja doktorske disertacije

Doktorska disertacija pod naslovom: "*Distributed Reinforcement and Deep Learning for Spectrum Management in Cognitive Radio Networks*" ima ukupno 8 poglavlja i spisak literature. Poglavlja su:

1. *Introduction,*
2. *Cognitive radio networks,*
3. *Reinforcement learning,*
4. *Distributed reinforcement learning,*
5. *Neural networks and deep learning,*
6. *Joint spectrum sensing and channel selection,*
7. *Spectrum sensing by modulation classification using deep neural networks,*
8. *Conclusion.*

U nastavku je dat kratak prikaz pojedinačnih poglavlja.

U uvodnom razmatranju ukratko je izložen problem koji će se razmatrati u ovoj disertaciji, kao i ciljevi, metodologija istraživanja, hipoteze i značaj rada. Uvod sadrži i opšte podatke o trenutnom stanju razvoja oblasti od interesa u svetu u oblasti istraživanja.

U okviru drugog poglavlja uvedena je tematika koja se razmatra u disertaciji. Definirane su kognitivne radio mreže, osnovni koncepti i predstavljeni su izazovi u ovoj oblasti, u cilju čijeg rešavanja se predlaže primena šeme konsenzusa višestrukih agenata bazirana na učenju potkrepljenjem, kao i dubokog učenja.

Treće poglavlje uvodi teorijske principe učenja potkrepljenjem i razmatra njegovu primenu u kognitivnim radio mrežama.

Četvrto poglavlje istražuje koncepte decentralizovanog učenja i saradnje više agenata, koji su ključni za implementaciju praćenja spektra i selekciju kanala na distribuiran način.

Peto poglavlje je posvećeno neuralnim mrežama i dubokom učenju sa naglaskom na njihovu ulogu u unapređenju performansi kognitivnih radio sistema.

U šestom poglavlju prikazan je novi algoritam za efikasnije upravljanje spektrom i izbor kanala u kognitivnim radio mrežama, koji predstavlja ključni doprinos doktorske disertacije. Algoritam je zasnovan na učenju potkrepljenjem i konsenzusu većeg broja agenata/korisnika koji koriste distribuirani način komunikacije. U ovom poglavlju razmatrane su teorijske osnove predloženog algoritma, njegove ključne prednosti u kontekstu robusnosti, skalabilnosti i brzine konvergencije. Pored toga predstavljeni su eksperimentalni rezultati simulacije.

Sedmo poglavlje fokusira se na primenu dubokog učenja za preciznu klasifikaciju modulacija u praćenju spektra, pružajući robusnu metodu za identifikovanje karakteristika signala korisnika spektra u realnim uslovima.

Na kraju disertacije iznet je zaključak, predstavljeni doprinosi istraživanja sa mogućim daljim pravcima razvoja u ovoj oblasti. Na kraju je dat spisak referentne literature.

6. Postignuti rezultati i naučni doprinos doktorske disertacije

U okviru doktorske disertacije prikazan je novi distribuirani i decentralizovani algoritam za zajedničko upravljanje spektrom i odabir kanala u kognitivnim radio mrežama. Predloženi pristup koristi učenje potkrepljenjem uz pomoć više agenata i poboljšano distribuiranim iteracijama konsenzusa preko usmerenih, potencijalno vremenski promenljivih komunikacionih grafova. Primarni cilj ovog rada je da pokaže efikasnost integrisanja konsenzus šema u okvire za rešavanje ključnih izazova u kognitivnim radio mrežama. Nadovezujući se na temeljne ideje predstavljene u ranijim istraživanjima u tezi su prikazana dva nova algoritma, koja kroz njihovu teorijsku analizu i sveobuhvatne simulacije potvrđuju unapređenje performansi u pogledu

robusnosti, skalabilnosti i brzini konvergencije. Predloženi algoritam pokazuje nekoliko ključnih prednosti: sposoban za korišćenje u velikim radio mrežama i otporan na kvarove čvorova ili komunikacione veze. Svojstva konvergencije, pretpostavke i ograničenja algoritma su rigorozno analizirani i diskutovani. Rezultati simulacije ističu prednosti ovog višeagentnog učenja potkrepljenjem (engl. *Multiagent Reinforcement Learning – MARL*) zasnovanog na konsenzusu. Čak i sa proređenim komunikacionim mrežama zasnovanim na razmeni informacija sa susedima, algoritam postiže performanse koje su blisko približne globalnom optimumu. Štaviše, numerička poređenja naglašavaju superiornost ovog pristupa, zasnovanog na razmeni procena funkcije lokalne vrednosti (Q -vrednosti), nad alternativnim kooperativnim šemama učenja koje se oslanjaju na deljenje lokalnih dobitaka.

Predloženo rešenje se može posmatrati kao:

- Alat za koordinaciju za upravljanje akcijama više čvorova/agenata, od kojih je svaki odgovoran za različite oblasti, a ipak radi ka zajedničkom cilju.
- Alat za paralelizaciju koji poboljšava brzinu konvergencije, posebno koristan za izazove visoke dimenzije, kao što su oni koji uključuju veliki broj frekvencijskih kanala.
- Alat za uklanjanje/smanjenje šuma koji koristi sposobnost da usredsredi različite realizacije šuma koji imaju različite izvore. Ovo je posebno korisno kada se neki agenti suočavaju sa velikom verovatnoćom greške u detekciji spektra ili nailaze na povećane stope grešaka u paketima na određenim kanalima. U takvim slučajevima, odluke ovih agenata obično se koriguju većim brojem čvorova sa povoljnijim uslovima.

Osim toga, deo rada obuhvatao je simulacije modela dubokog učenja u svrhu klasifikacije ili prepoznavanja modulacije u radio sistemima, za potrebe implementacije u okviru kongitivnih radio mreža. Nekoliko arhitektura dubokih neuronskih mreža je istraženo i različito ocenjeno, upoređujući njihove performanse i demonstrirajući potencijal metoda dubokog učenja za direktno učenje vremenskih obrazaca iz sirovih podataka signala. Primenom „slepog“ temporalnog učenja, u kome se sirovi uzorci podataka unose u mrežu, modeli su obučeni na javno dostupnim skupovima podataka, a rezultati su upoređeni sa postojećim dostupnim modelima. U radu je pokazano da kombinovanje predloženog algoritma konsenzusa između agenata koji pokreću DL modele može značajno poboljšati tačnost klasifikacije modulacije.

7. Mišljenje i predlog Komisije o doktorskoj disertaciji

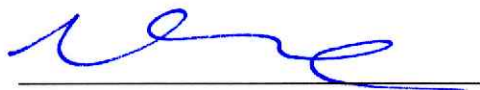
Na osnovu svega izloženog Komisija je mišljenja da doktorska disertacija kandidata Dejana Dašića po svojoj temi, pristupu, strukturi i sadržaju rada, kvalitetu i načinu izlaganja, metodologiji istraživanja, načinu korišćenja literature, relevantnosti i kvalitetu sprovedenog istraživanja i donetim zaključcima zadovoljava kriterijume zahtevane za doktorsku disertaciju, te se može prihvatiti kao podobna za javnu odbranu.

Sagledavajući ukupnu ocenu doktorske disertacije kandidata Dejana Dašića pod nazivom "*Distributed Reinforcement and Deep Learning for Spectrum Management in Cognitive Radio Networks*" predlažemo Veću departmana za posleddiplomske studije i Senatu Univerziteta Singidunum da prihvati napred navedenu doktorsku disertaciju i odobri njenu javnu odbranu.

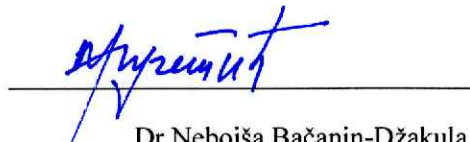
Beograd, 23/12/2024

Članovi komisije:

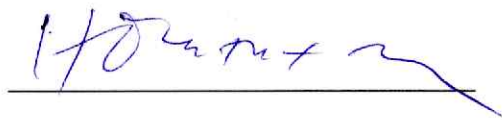
Dr Miloš Stanković, mentor
Redovni profesor, Univerzitet Singidunum, Beograd



Dr Miljan Vučetić, komentor,
Naučni savetnik, Vlatacom institut visokih tehnologija, Beograd; Redovni profesor, Univerzitet Singidunum, Beograd



Dr Nebojša Bačanić-Džakula,
Redovni profesor, Univerzitet Singidunum, Beograd



Dr Mladen Veinović,
Redovni profesor, Univerzitet Singidunum, Beograd



Dr Nemanja Ilić,
Viši naučni saradnik, Vlatacom institut visokih tehnologija, Beograd; Vanredni profesor, Računarski fakultet, Beograd

